

Handbuch zur Messung der empfundene Luftqualität

Luftqualität in Innenräumen

November 2004



Technische Universität Berlin
Hermann-Rietschel-Institut
Fachgebiet Heiz- und Raumlufttechnik
Marchstr. 4
10587 Berlin

Dipl.-Ing. Frank Bitter
Dr.-Ing. Olaf Böttcher
Dipl.-Ing. Arne Dahms
Dipl.-Ing. Johannes Kasche
Dr.-Ing. Birgit Müller
Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller

Vorwort

Die empfundene Luftqualität in Gebäuden gewinnt international zunehmend an Bedeutung. In der Planung und beim Betrieb von Gebäuden sind Konzepte zur Verbesserung der empfundenen Luftqualität jedoch oft schwer umzusetzen, da neben Kostenaspekten ein durchgehende Planungsmethodik und eine handhabbare Messtechnik fehlen.

Diese erste Version des Handbuchs zur Messung der empfundenen Luftqualität ist eine Zusammenfassung der internen Unterlagen, die in den letzten Jahren am Hermann-Rietschel-Institut zu diesem Themenkomplex erstellt worden sind. Ziel dieses Handbuchs ist die Erläuterung der wesentlichen Konzepte zur Luftqualitätsbestimmung in Innenräumen und eine kurze Darstellung der aktuellen Forschungsrichtung am Hermann-Rietschel-Institut. Das Handbuch soll dem Leser einen einfachen Einstieg in den interdisziplinären Themenkomplex „empfundene Luftqualität“ geben.

In der internationalen Literatur hat sich die Methodik von Prof. Ole Fanger aus Dänemark zur Bestimmung der empfundenen Luftqualität in Innenräumen durchgesetzt. Teile seiner Forschungsergebnisse sind bereits in die deutsche, europäische und internationale Normung eingeflossen. Nach Fanger lassen sich alle Geruchsquellen gleichsetzen, so dass sich die Gesamtbelastung eines Raumes durch Aufsummieren von Personen-, Baustoff- und Ausstattungslasten ergibt.

Untersuchungen von Baustoffen am Hermann-Rietschel-Institut zeigen ein sehr unterschiedliches Verhalten verschiedener geruchsaktiver Substanzen in Bezug auf die empfundene Intensität des Geruchseindrucks in Abhängigkeit von ihrer Konzentration. Nicht alle Gerüche können durch die Verdoppelung des Luftwechsels halbiert werden. Zur olfaktorischen Bewertung von Baustoffen wird deshalb an einem Konzept gearbeitet, mit dem diese Eigenschaften der geruchsaktiven Substanzen erfasst und abgebildet werden können.

Neben der Vermeidung von Befindlichkeitsstörungen in Gebäuden durch eine gut empfundene Luftqualität zeigen erste Studien auch eine positive Korrelation zwischen der empfundenen Luftqualität und der Produktivität. Somit erhält dieses Thema neben dem Attribut „wünschenswert“ auch eine wirtschaftliche Komponente, die neben allen klassischen Behaglichkeitsanforderungen der Klimatechnik bei Planung und Betrieb von Gebäuden beachtet werden sollte.

Begrifferklärung

Begriff	Definition im Sinne dieses Handbuchs
Adaptation	Empfindlichkeitsanpassung von Sinneszellen oder Sensoren an eine konstante Reizstärke. Vorübergehende Veränderung der Empfindlichkeit eines Sinnesorgans aufgrund ständiger und/oder wiederholter Stimulation /DIN EN 13725.
Akzeptanz	Maß für die Zufriedenheit mit einem Umgebungszustand.
Anosmie	Fehlende Empfindlichkeit gegen Geruchsreize (Geruchsblindheit). Es gibt partielle als auch totale Anosmie.
Empfundene Intensität	Geruchsintensität, die durch eine trainierte Probandengruppe ermittelt wird. Sie stellt die ermittelte Größe bei Intensitätsmessungen mit einer trainierten Probandengruppe im Vergleich mit einem Maßstab dar.
Empfundene Luftqualität	Größe zur quantitativen Erfassung der vom Menschen empfundenen Luftqualität. Die empfundene Luftqualität wird mit untrainierten Probanden ermittelt.
Erkennungsschwelle	Kleinste Geruchsstoffkonzentration, bei der 50% der Probanden den Geruch identifizieren können.
Geruchsintensität	Stärke eines Geruchseindrucks.
Geruchsschwellen	Geruchsschwellen beschreiben minimale Konzentrationen eines Geruchstoffes bei denen der Geruch durch die Mehrheit der Probanden wahrgenommen (Wahrnehmungsschwelle) oder erkannt (Erkennungsschwelle) werden kann.

Hedonische Geruchswirkung	Bewertung eines Geruchseindrucks innerhalb der Merkmalspole „äußerst angenehm“ bis „äußerst unangenehm“.
Individuelle Wahrnehmungsschwelle	Die individuelle Wahrnehmungsschwelle bezieht sich auf die kleinste von einer Person wahrgenommene Konzentration eines Geruchsstoffes in der Luft.
Olfaktometrie	Messen der Reaktion der Probanden auf Geruchsreize.
Prozentsatz Unzufriedener (PD)	Prozentualer Anteil der mit dem Umgebungszustand unzufriedenen Probanden einer Probandengruppe.
Raumluftqualität	Die Raumluftqualität umfasst alle nichtthermischen Wirkungen der Raumluft, die Einfluss auf das Wohlbefinden und Gesundheit des Menschen haben.
Sick Building Syndrom (SBS)	Begriff für gesundheitliche Beschwerden, die bei Aufenthalt in einem Gebäude auftreten und bei Verlassen des Gebäudes wieder nachlassen oder verschwinden. Bei den Beschwerden handelt es sich u.a. um Kopfschmerzen, Haut- und Augenirritationen, trockene Schleimhäute.
Wahrnehmungsschwelle	Kleinste Geruchsstoffkonzentration, bei der 50% der Probanden einen Geruch wahrnehmen können.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Historie der Luftqualitätsforschung	1
1.2	Sick Building Syndrom (SBS)	3
1.3	Übersicht der verschiedenen Messverfahren	3
1.4	Einsatzfelder für Luftqualitätsmessungen	4
2	Der menschliche Geruchssinn	6
2.1	Geruchswahrnehmung	9
2.2	Geruchsschwellen	11
2.3	Einfluss von Feuchte und Temperatur	13
3	Geruchsstoffe	15
3.1	VOCs	15
3.2	Mikroorganismen	15
3.3	Pilze	16
4	Probennahme- und Darbietungsverfahren	18
4.1	Probennahme	18
4.1.1	Direktbewertung von Räumen	18
4.1.2	FLEC-Verfahren	18
4.1.3	Emissionskammer (CLIMPAQ)	19
4.1.4	AirProbe I	21
4.2	Probenlagerung	23
4.3	Probendarbietung	24
4.3.1	Notwendige Luftmengen	24
4.3.2	Bewertungstrichter	25
4.3.3	Luftqualitätslabor am Hermann-Rietschel-Institut	26
4.3.4	Probendarbietung für das VDI-Verfahren	28
4.3.5	Dezipolmeter	29
4.4	Vergleichsmaßstab (Meilensteine)	30
5	Personengebundene Messverfahren	33
5.1	Fanger-Methode	33
5.1.1	Geruchsuntersuchungen mit untrainierten Probanden	35
5.1.2	Geruchsuntersuchungen mit trainierten Probanden	36
5.1.3	Training von Probanden	37
5.1.4	Bestimmung unbekannter Gerüche	41
5.1.5	Auswertung der Trainingsergebnisse	42
5.2	Befragungen von Probanden	46

5.3	Durchführung einer direkten Raumbewertungen	47
5.4	Zweistufiges Bewertungsverfahren.....	49
5.4.1	Aufbau des zweistufiges Bewertungsverfahrens	52
5.4.2	Einführung der empfundenen Intensität	53
5.4.3	Logarithmische Kennlinien für die empfundene Intensität.....	53
5.4.4	Addition von Geruchsintensitäten	55
5.4.5	Die zweite Stufe des Bewertungsverfahrens	58
5.5	VDI-Verfahren.....	59
6	Technische Messverfahren	64
6.1	Chemische Analysen	64
6.1.1	Beschreibung eines gaschromatographischen Systems.....	64
6.1.2	Auswertung von Gaschromatogrammen	65
6.1.3	Thermodesorption und Kaltaufgabesystem	66
6.1.4	Massenspektrometer	67
6.2	Multigassensoren.....	68
6.2.1	Funktionsprinzip eines Multigassensors	68
6.2.2	Sensorsysteme am HRI.....	70
6.2.3	Auswertung der Messsignale.....	72
6.2.4	Einsatz von Multigassensoren in der Raumluftechnik	74
6.3	Kombinierte Messverfahren.....	74
6.3.1	Sniffer/ Olfactory Detector Port (ODP)	74
7	Normen und Richtlinien	76
7.1	DIN 1949 Teil 2	76
7.2	VDI 3881 – VDI 3883.....	76
7.3	DIN EN 13725	76
7.4	ASHRAE Standard 62-2001	77
7.5	CEN Bericht CR 1752	77
7.6	DIN EN 13419-1	77
7.7	M1 Emission Classification of Building Materials	78
7.8	Nordtest Methode NT BUILD 482	78
7.9	Nordtest Methode NT BUILD 484	78

1 Einleitung

Gerüche entstehen aus einer Vielzahl chemischer Substanzen und längst sind nicht alle Stoffe erfasst, die beim Menschen eine Geruchsempfindung auslösen. Bis zu 8000 unterschiedliche Substanzen können in der Raumluft nachgewiesen werden, jedoch kann mit einer quantitativen Bestimmung jedes Einzelstoffes keine Aussage über die Geruchswirkung einer beliebigen Kombination getroffen werden.

Wurde früher unter dem Begriff Luftqualität in erster Linie der Schadstoffgehalt erfasst, so hat sich heute in fast allen Anwendungsbereichen auch die empfundene Luftqualität etabliert, mit welcher ein Geruch im Raum beurteilt werden kann. Automobilkonzerne beschäftigen eigene Geruchslaboranten, um Geruchsquellen auf die Spur zu kommen. Umwelttechnische Labore untersuchen die Geruchsbelastung durch Industrieanlagen und landwirtschaftliche Großbetriebe. Im deutschen und europäischen Normenwerk finden sich Verfahrensanweisungen und Mindestanforderungen zur Bewertung der empfundenen Luftqualität in der Außenluft jedoch nicht für die Innenraumluftqualität.

Starke Geruchsbelastungen können das Wohlbefinden beeinträchtigen und sich auch auf die Arbeitseffektivität auswirken.

Trotz der immer besseren Analysemöglichkeiten und der Entwicklung von Sensorsystemen, so genannten „künstlichen oder elektronischen Nasen“, gelingt es bis heute nicht, die menschliche Nase bei der Bestimmung der empfundenen Luftqualität zu ersetzen.

1.1 Historie der Luftqualitätsforschung

Bereits Mitte des 19. Jahrhunderts führte **Max von Pettenkofer** Untersuchungen zur Luftqualität durch (Von Pettenkofer, 1858)¹. Unter der Voraussetzung, dass durch Reinigung Geruchsquellen weitestgehend aus dem Raum geschafft werden, betrachtete er den Menschen als die alleinige Verunreinigungsquelle im Raum. So führte Pettenkofer den CO₂-Gehalt der Raumluft als Indikator für die Verunreinigung durch Personen ein. CO₂ ist geruchlos und vom Menschen nicht direkt wahrnehmbar.

Aus seinen Untersuchungen leitete Pettenkofer das Kriterium für die Luftqualität in Innenräumen ab. Er schlug vor, eine maximale Kohlendioxidkonzentration von 0,1 Vol. % bzw. 1000 ppm CO₂ nicht zu überschreiten. Dieser Wert wird auch als

¹ Von Pettenkofer, Max: Über den Luftwechsel in Wohngebäuden, Literarisch-Artistische Anstalt der J.G. Cotta'schen Buchhandlung, München, 1858

Pettenkofer-Zahl bezeichnet und hat noch heute in der nationalen und internationalen Normung Bestand. Dabei ging er von einem Grundpegel in der Außenluft von 500 ppm CO₂ aus.

Yaglou führte bei seinen Raumklimauntersuchungen von 1936/1937 erstmals eine subjektive Methode zur Bewertung der Raumluftqualität ein (Yaglou, 1936)². Die Intensität der Luftprobe wurde durch untrainierte Probanden auf einer Skala von 0 bis 5 beurteilt. Seine Untersuchung war so aufgebaut, dass die Personen sofort nach Betreten des Raumes, also im unadaptierten Zustand, die Luftqualität bewerten sollten. Da jeder Mensch die Luftqualität anders beurteilt, müssen über eine statistische Auswertung der Unzufriedenheit der Nutzer Anhaltspunkte über die Qualität der Luft gefunden werden. Bei guter Luftqualität ist nur eine geringe Anzahl an Probanden unzufrieden, bei schlechter Luftqualität steigt diese Anzahl. Diese Art der Bewertung ist nicht einfach zu handhaben, da bei einer Gruppe untrainierter Probanden eine entsprechend große Anzahl an Probanden befragt werden muss, um statistisch abgesicherte Ergebnisse zu erhalten.

Yaglou³ stellte aufgrund seiner Untersuchungen folgende Thesen auf:

- In einem dicht besetzten Raum wird eine höhere personenbezogene Lüftungsrate benötigt als in einem schwach besetzten Raum.
- Von Raumnutzern ausgeatmetes Kohlendioxid ist kein geeignetes Merkmal für den Nachweis von Körpergeruch.
- Körpergeruch ist sehr instabil.

Ole Fanger von der Universität von Dänemark in Kopenhagen führte 1988 zur Beurteilung zwei neue Maßeinheiten ein (Fanger, 1988)⁴. Er ging bei seinen Überlegungen davon aus, dass eine Beurteilung der Innenraumluft am ehesten durch einen Besucher zu erzielen ist. Jemand der sich bereits im Raum befindet, ist aus seiner Sicht weniger geeignet, da er schon an die Raumluft adaptiert ist. Fanger arbeitete mit Probandengruppen, um individuell bedingte Beurteilungseigenheiten so weit wie möglich auszuschalten. Die Teilnehmer fällen die Bewertung unmittelbar nach Betreten des zu beurteilenden Raumes, wobei diese auf Fragebögen festgehalten werden. Neben der Fragestellung der Akzeptanz kann von den Probanden auch die Geruchsintensität und die Frische der Raumluft beurteilt werden.

² Yaglou, C. P.; Riley, E. C.; Coggins, D. I.: Ventilation Requirements (Part 1), ASHVE Transactions, Vol. 42, 1936, 133-162

³ Yaglou, C. P.; Witheridge, W. N.: Ventilation Requirements (Part 2), ASHVE Transactions, Vol. 43, 1937, 423-436

⁴ Fanger, O. P.: Introduction of the olf and the decipol Units to Quantify Air Pollution Perceived by Humans Indoors, Energy and Buildings, 12, 1988, 1 - 6

Am **Hermann-Rietschel-Institut**⁵ wurde eine neue, zweistufige Systematik zur Bewertung der empfundenen Luftqualität eingeführt. Ein Material gibt verschiedene chemische Substanzen an die Umgebungsluft ab. In der ersten Bewertungsstufe detektiert die Nase die vom Material emittierten geruchsaktiven Substanzen und bewertet diese aufgrund unterschiedlicher Empfindlichkeit mit der empfundenen Intensität II. Die relative Feuchtigkeit der Luft beeinflusst die Bewertung des Intensitätseindrucks des Geruchs. Trainierte Probanden ordnen die Intensität des Geruchs einer Probe unter Verwendung der Referenzproben (Azeton) des Maßstabs ein. Die Akzeptanz des Geruchseindrucks wird nicht mit dieser Bewertung abgefragt.

In der zweiten Stufe des Riechvorgangs bewertet das Gehirn die von der Nase gesendeten Signale. Neben der Intensität entscheidet nun die Hedonik des Geruchs über sein Wirken auf den Probanden.

1.2 Sick Building Syndrom (SBS)

Unter dem Begriff Sick-Building-Syndrom (SBS) werden Störungen des Wohlbefindens und der Behaglichkeit zusammengefasst, die in einem engen Zusammenhang mit dem Aufenthalt in bestimmten Gebäuden stehen. Die meisten Beschwerden sind unspezifischer Natur und treten auch in anderen Lebensbereichen auf (z.B. Müdigkeit, Konzentrationsstörungen, Kopfschmerzen). Das SBS ist also in erster Linie nur als kollektives Phänomen durch systematische, vergleichende Befindensbefragungen zu identifizieren. Im Unterschied zum SBS werden die an Einzelpersonen diagnostizierbaren Symptome mit Krankheitswert als Building Related Illness (BRI) bezeichnet, wenn ein klarer Kausalzusammenhang mit der Lokalität hergestellt werden kann.

Das Sick-Building-Syndrom trat verstärkt Anfang der 80er Jahre auf, als die Lüftungsraten in den Bürogebäuden als Reaktion auf die Energiekrisen der 70er Jahre gesenkt wurden, um Energie einzusparen. Hierbei wurden die inneren Verunreinigungslasten nicht vermindert, was zu einer erhöhten Schadstoffbelastung in den Räumen führte.

1.3 Übersicht der verschiedenen Messverfahren

Es haben sich viele verschiedene Messmethoden für Luftqualitätsuntersuchungen entwickelt. Zunächst können die Verfahren, wie in Abb. 1 gezeigt, in personen-gebundene und nicht personengebundene (technische) Verfahren unterteilt werden. Besonders im Bereich der personengebundenen Verfahren hat sich eine

⁵ Müller, D.; Bitter, F.; Böttcher, O.; Kasche J.; Müller, B.: Neue Systematik zur Bewertung der empfundenen Luftqualität; Berlin, HLH 2004

Vielzahl von Messmethoden entwickelt, deren Ergebnisse nur selten verglichen werden können.

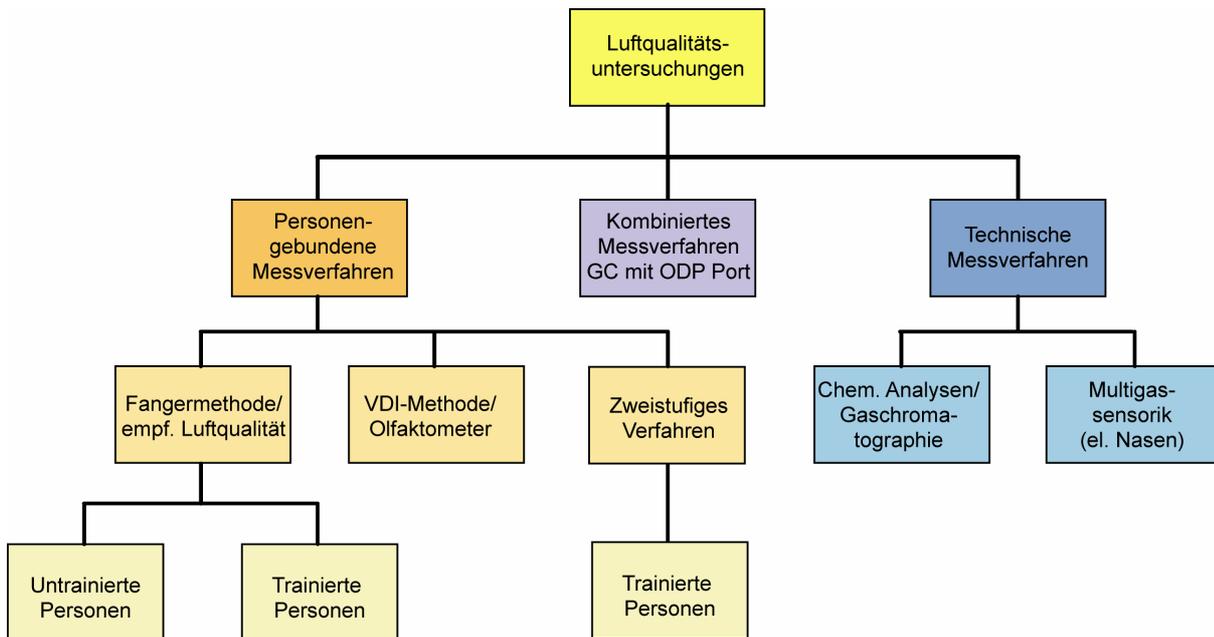


Abb. 1: Verfahren für die Bewertung der Luftqualität

Das Handbuch soll eine kurze Beschreibung der verschiedenen Verfahren liefern und somit ein Beitrag zur Übersichtlichkeit des Forschungsgebiets der empfundenen Luftqualität erbringen.

1.4 Einsatzfelder für Luftqualitätsmessungen

Die in diesem Handbuch beschriebenen Verfahren zur Bewertung der Luftqualität beziehen sich im Wesentlichen auf folgende drei Anwendungsgebiete:

Luftqualität in Innenräumen

Bei der direkten Bewertung betreten die Probanden den zu beurteilenden Raum und führen in dem Raum die Bewertung der Luftqualität durch.

Weil eine Vielzahl von äußeren Faktoren die Bewertung beeinflussen können (visuelle und akustische Beeinflussung, innere Erwartungshaltung), ist für ein objektives Ergebnis die indirekte Bewertung entwickelt worden. Mit einer geeigneten Apparatur wird die zu bewertende Raumluft in Behälter gefüllt und unter kontrollierten Laborbedingungen bewertet.

Bewertung von Geruchsquellen

Gerüche in Räumen sind in der Regel auf eine Vielzahl von Quellen zurückzuführen. Die geruchliche Bewertung des Emissionsverhaltens von Baumaterialien, Einrichtungsgegenständen, Reinigungsmitteln, Farben, Lacken usw. kann im Labor unter optimalen Bedingungen durchgeführt werden. Der Innenraum ist

ebenso wie die Umgebung nur in Ausnahmefällen ein statischer Bereich, da die Quellstärke, raumklimatische Bedingungen und mögliche Senken die Geruchsstoffkonzentration laufend verändern. Der Einsatz von Messkammern ermöglicht die Kontrolle der die Quellstärke beeinflussenden Faktoren.

Bewertung von Anlagenkomponenten

Lüftungstechnische Anlagen setzen sich aus einzelnen Modulen zusammen, die in erster Linie ihrer Funktion entsprechend optimiert wurden. Eine Optimierung hinsichtlich des Emissionsverhaltens der eingesetzten Materialien (Metall, Kunststoff, Gummi) wird erst seit kurzer Zeit teilweise durchgeführt.

Direkte Bewertungen sind schwierig durchzuführen, da sich Lüftungstechnische Anlagen in der Regel nicht in einer idealen Umgebung befinden und sich Probenluft aus der Anlage nur unter einem unverhältnismäßig großen Aufwand darbieten lässt. Mit einer Modellanlage, deren luftberührte Bauteile ausschließlich aus Glas und Edelstahl bestehen und bei der auf den Einsatz von emittierenden Dichtungsmaterialien und Farben verzichtet wurde, lassen sich einzelne Komponenten unter reproduzierbaren Umgebungsbedingungen bewerten.

2 Der menschliche Geruchssinn

Die Nase befeuchtet und erwärmt die eingeatmete Luft. Gleichzeitig dient sie als Reflexorgan (z.B. Niesen bei Staubeintritt) und ist Sitz der Riechrezeptoren. Beim Atmen wird Luft über die Nasenhöhle eingesaugt und strömt anschließend in den Nasenraum. Dieser ist fast vollständig mit Schleimhaut ausgekleidet. Über den Nasenrachenraum gelangt die Luft in die tieferen Atemwege. Verantwortlich für die Geruchswahrnehmung ist die olfaktorische Region (Riechepithel, Riechkolben). Dieser Bereich ist ein ca. $2 \times 2,5 \text{ cm}^2$ (Deetjen, 1992)⁶ bis $2 \times 5 \text{ cm}^2$ (Schmidt, 2000)⁷ großer Bereich der Riechschleimhaut. Auf der Riechschleimhaut befinden sich die Geruchsrezeptoren, so genannte Zilien. Der Aufbau der Riechschleimhaut ist in Abb. 2 dargestellt. Die Riechschleimhaut setzt sich laut Schmidt aus den Riechsinneszellen, Stützzellen, Zilien, Riechköpfchen und einigen Drüsen zusammen.

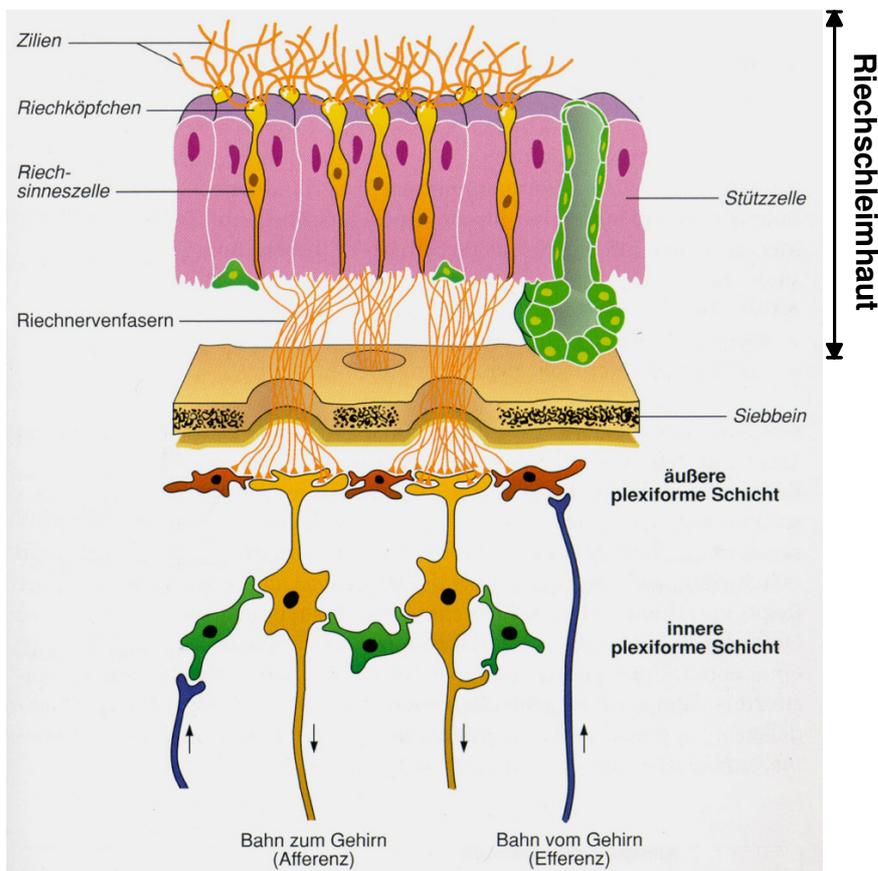


Abb. 2: Schematischer Aufbau der Riechschleimhaut mit den Verbindungen zum Riechkolben (Schmidt, 2000)⁷

⁶ Deetjen, P.; Speckmann, E.-J.: Physiologie; Urban & Schwarzenberg, München, 1992

⁷ Schmidt, R. F.; Schaible, H.-G.: Neuro- und Sinnesphysiologie, 4. Auflage, Springer Verlag Berlin-Heidelberg, 2000

Nach Schmidt erzeugen die Geruchsrezeptoren (Zilien) elektrische Impulse und leiten diese über die Riechnervenfasern weiter. An der einzigen Schaltstelle (äußere plexiforme Schicht) zwischen den Rezeptoren und der Hirnrinde (innere plexiforme Schicht) werden die Geruchsinformationen gebündelt und auf eine Nervenzelle des Riechkolbens übertragen. Aus dem Riechkolben werden dann die Geruchsinformationen auf Nervenbahnen (Axone) zum Gehirn weitergeleitet. Im Zusammenspiel mit anderen Hirnregionen (Thalamus, limbisches System) erkennt das Gehirn den Geruch. Bestehende Erinnerungen werden aktiviert und der ankommende Reiz wird integriert. Durch den Geruchssinn werden andere Funktionskreise des Menschen beeinflusst. So gibt es durch die enge Bindung an das limbische System eine stark emotionale Komponente der Geruchswahrnehmung. Es können bei der Geruchswahrnehmung sehr schnell Lust- bzw. Unlustgefühle geweckt werden. Diese Gefühle werden als hedonische Komponente der Geruchswahrnehmung bezeichnet.

In Abb. 3 bis Abb. 5 wird die Umwandlung der chemischen Duftreize in elektrische Signale dargestellt. Diese Umwandlung (Transduktion) beginnt mit dem Kontakt eines Duftmoleküls mit einem spezifischen Rezeptorprotein in der Zilienmembran.

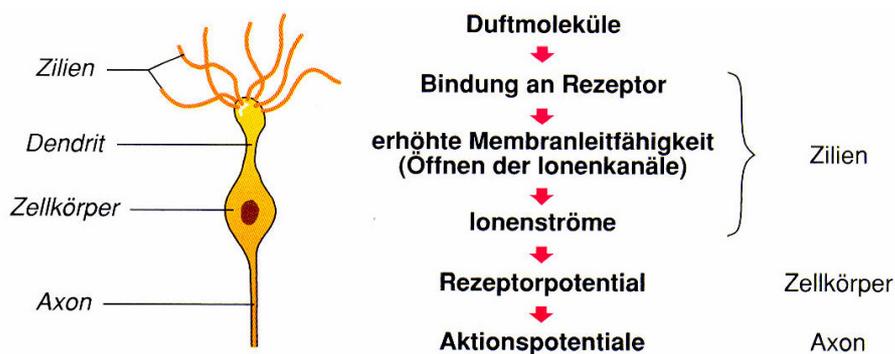


Abb. 3: Von der Bindung eines Duftmoleküls zum Aktionspotential (Schmidt, 2000)⁷

In Abb. 3 sind die Schritte dargestellt, die von der Bindung des Duftmoleküls an das Rezeptorprotein bis zum Auftreten der Aktionspotentiale reicht. Mit der Bindung (auch Abb. 4) wird die Membranleitfähigkeit durch Öffnen von Ionenkanälen erhöht und ein Ionenstrom erzeugt (Na-Pumpe). Dieser Ionenstrom ruft eine Zellpolarisation hervor. Es entsteht ein Rezeptorpotential im Zellkörper, welches ein Aktionspotential hervorruft, das über das Axon weitergeleitet wird.

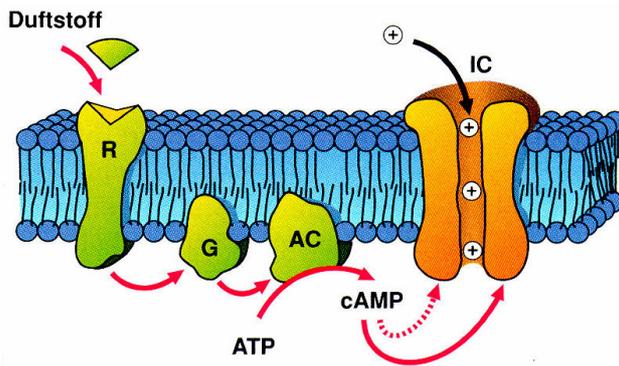


Abb. 4: Intrazellulärer Verstärkungsmechanismus in der Zilienmembran (Schmidt, 2000)⁷

In Abb. 4 zeigt Schmidt das Prinzip der Signalverstärkung in der Zilienmembran (vgl. Abb. 3, Zilien). Kommt es zu einer Wechselwirkung zwischen Duftstoff und Rezeptor (R), wird der Verstärkungsmechanismus ausgelöst. Ein G_s-Protein (G) aktiviert das Enzym (AC Adenylatcyclase), das wiederum die Konzentration des Botenstoffes cAMP in der Zelle erhöht. Geruchsstoffe können Tausende dieser Boten freisetzen. Unter einem G_s-Protein versteht man ein **stimulierendes (s) Guanylnukleotid (G)**, welches ein regulatorisches Protein ist. Die Abkürzung cAMP steht für „**cyklisches Adenosinmonophosphat**“. Die cAMP -Moleküle öffnen Kationenkanäle in der Zellmembran. Das Einströmen von Kationen (Natrium, Kalzium) durch diesen Kanal in die Zellen ruft ein Rezeptorpotential hervor.

Nach Deetjen et al. befinden sich die Zilien in einer Schleimschicht, welche von den Geruchsmolekülen zunächst einmal durchdrungen werden muss. Dazu müssen die Geruchsstoffe ausreichend flüchtig und hinreichend wasserlöslich sein und eine gewisse Fettlöslichkeit aufweisen.

Durch das Einströmen der Kalzium- und Natriumionen in die Zelle erhöht sich dort die Kalziumkonzentration, siehe Abb. 5. Im Kanal können die Ionen gebunden werden, was zu einer Blockade des Kanals führt. Der Kanal schaltet sich selbst ab.

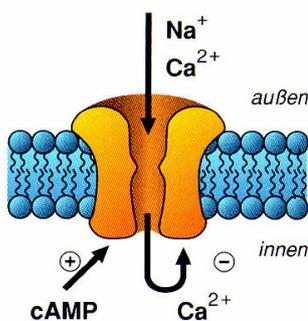


Abb. 5: Kalziumionen beim Einströmen in den Kanal (Schmidt, 2000)⁷

Der Geruch wird nicht mehr wahrgenommen. So kann der Prozess der Adaptation auf molekularer Ebene erklärt werden. Unter Adaptation versteht man den Vorgang der Gewöhnung an Gerüche und der damit verbundenen Reduktion der Empfindungsstärke. Nach längerem Verweilen in einer gleichen Umgebung werden Gerüche nicht mehr so intensiv oder gar nicht mehr wahrgenommen. Wird der Rezeptor nicht mehr gereizt, wird die ursprüngliche Natrium- und Kalziumkonzentration wieder hergestellt.

2.1 Geruchswahrnehmung

Die Wahrnehmung der Sinnesorgane wurde Mitte des 19. Jahrhunderts von E. H. Weber untersucht (Weber, 1850)⁸. Zu den Sinneswahrnehmungen gehört auch das Geruchsempfinden. Weber stellt bei seinen Versuchen fest, dass die Reizstärke um einen bestimmten Bruchteil des Ausgangsreizes ansteigen muss, damit eine Veränderung bei der Reizwahrnehmung auftritt.

Früher wurde dieser Reizzuwachs als Differenzlimen (DL) bezeichnet; heute wird hierfür häufig die englische Abkürzung „**jnd**“ (just noticeable difference) verwendet. Große Reize müssen sich um einen größeren absoluten Betrag unterscheiden als kleinere, aber in einem mittleren Bereich der Sinnesmodalität bleibt der notwendige prozentuale Zuwachs konstant. Er legte den so genannten Weber-Quotienten fest:

$$c = \frac{\Delta R}{R}, \quad (\text{Gl. 1})$$

mit c: Weber-Quotient
 ΔR : Reizzuwachs
 R: Ausgangsreiz.

Je nach Art des Sinnes liegt dieser Quotient im Bereich von 0,07 bis 0,12 (d.h. Zunahme der Reizstärke um 7 – 12 %), um einen spürbaren Reizunterschied wahrzunehmen. Dieses Gesetz gilt jedoch nicht für schwache Reize im Bereich der Wahrnehmungsschwelle.

Der Zusammenhang von Weber wurde von G.T. Fechner (Fechner, 1860)⁹ weiterentwickelt. Er ermittelte ein allgemeines Gesetz zwischen Reizstärke und Reizempfindung. Er setzte den von Weber ermittelten Quotienten als Grundeinheit an und ermittelte die Empfindungsstärke als Zahl der überschrittenen Unterschiedsstufen. Die Beziehung, die er erhielt, ist als Weber-Fechner-Gesetz bekannt:

⁸ Weber, E. H.: Der Tastsinn und das Gemeingefühl, Wagner Handwörterbuch Physiologie, 2. dep., Vol. 3, 1850, S.481-588

⁹ Fechner, G. T.: Elemente der Psychophysik, Bd. 2, Breitkopf und Härtel Leipzig, 1860

$$E = k \cdot \log\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad (\text{Gl. 2})$$

mit k: Weber-Fechner-Koeffizient
E: Empfindungsstärke
R: Reizstärke
R₀: Reizstärke an der Geruchsschwelle.

Eine logarithmische Zunahme der Reizstärke führt damit zu einer linearen Zunahme der Empfindungsstärke. Fechner definierte eine absolute Reizschwelle. An dieser Schwelle wird der Reiz zum ersten mal wahrgenommen.

Fechner setzte für seine Formel voraus, dass das Verhältnis von Reizzuwachs zu Grundreiz über den gesamten Intensitätsbereich gleich bleibt. Das wurde in den sechziger Jahren von Stevens (Stevens, 1957)¹⁰ kritisiert.

Um zu befriedigenden Angaben über die Empfindungsstärken einer Sinnesmodalität zu gelangen, führte Stevens die Methode der quantitativen Abschätzung der Empfindungsstärke ein. Die Art der quantitativen Beziehung zwischen Reiz- und Empfindungsgröße hängt deutlich von der Skalierungstechnik ab. Stevens führte seine Experimente ausschließlich auf Basis einer Verhältnisskala durch. Die Personen sollten dabei angeben, wann ein Reiz, etwa ein Geruchreiz, doppelt so stark ist wie ein Vergleichsreiz. Es kommt hierbei nicht auf die Unterscheidbarkeit an, sondern auf eine Angabe über die subjektive Intensität der Empfindung.

Er führte Versuche zur Bestimmung der Funktionen zwischen Reizstärke und Empfindungsstärke durch und ermittelte aus den Messergebnissen eine Potenzfunktion aus dem Abstand der Reizstärke von der Wahrnehmungsschwelle des Reizes. Diese Funktion wird auch Stevens-Potenzfunktion genannt und hat folgende Form:

$$E = k \cdot (R - R_0)^n \quad (\text{Gl. 3})$$

mit k: Konstante
E: Empfindungsstärke
R: Reizstärke
R₀: Reizstärke an der Geruchsschwelle
n: Exponent.

In Bezug auf den Geruchssinn liegt der Exponent n für die meisten Geruchsstoffe im Bereich von 0,2 bis 0,7, ist also kleiner als 1. Das bedeutet, dass bei einer Reduzierung der Geruchslast der empfundene Geruch nicht in demselben Maße abnimmt.

¹⁰ Stevens, S. S.: On the Psychophysical Law, Psychological Review, Vol. 64, 1957, S. 153-181

Diese Betrachtungen beziehen sich auf die Intensität des Geruchs. Neben der Intensität ist das Geruchsempfinden auch durch die hedonische Wirkung bestimmt, d.h. ob ein Geruch als angenehm oder unangenehm empfunden wird. Die hedonische Note eines Geruchsstoffes kann sich mit der Intensität auch umkehren. So werden z.B. Kaffeearomen in niedrigen Konzentrationen als angenehm empfunden, bei hohen jedoch als unangenehm. Bei Emissionen aus Klimaanlage kann davon ausgegangen werden, dass der Geruch eher als unangenehm empfunden wird und bei den Untersuchungen nur die Intensität von Bedeutung ist.

Das Weber-Fechner-Gesetz hat sich zur Beschreibung der Reizübertragung für den Tastsinn, das Gehör, den Seh- und den Geschmackssinn durchgesetzt. Für die Beschreibung des Geruchssinns wird jedoch bis heute der Zusammenhang zwischen Empfindungsstärke und Reizstärke nach Stevens verwendet.

2.2 Geruchsschwellen

Cain et al. (Cain, 1996)¹¹ konnten zeigen, dass bereits geringe Konzentrationen eines flüchtigen organischen Stoffes ausreichen, um bei Menschen Schleimhautreizungen auszulösen. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abb. 6 dargestellt.

Aus Abb. 6 wird ebenfalls deutlich, dass die Geruchsschwellen der untersuchten Stoffe um 3 bis 4 Zehnerpotenzen unter den Schwellenkonzentrationen für Schleimhautreizungen in Nase und Augen liegen. Die Geruchsschwelle ist bei einzelnen Personen die kleinste, gerade noch wahrnehmbare Geruchsstoffkonzentration. Für Personengruppen ist sie nach DIN EN 13725¹² als die Konzentration definiert, bei der 50 % der befragten Personen den Geruch wahrnehmen. Weiterhin wird vermutet, dass die Geruchsschwelle mit der Kettenlänge der Moleküle, also mit der Anzahl von Kohlenstoffatomen, innerhalb einer Molekülfamilie sinkt.

Weitergehende Untersuchungen mit aliphatischen Alkoholen von Jensen et al. (Jensen, 1996)¹³ bestätigen dieses Ergebnis. Sie demonstrieren aber auch, dass dies nur bis zu einer bestimmten Kettenlänge gilt. Danach verändert sich die Geruchsschwelle nur noch unwesentlich. Die niedrigste Geruchsschwelle wurde in diesen Untersuchungen für Hexanol (Molekulargewicht 102 g/mol) ermittelt. Mit

¹¹ Cain, W.S.; Cometto-Muniz, J. E.: Sensory Irritation Potency of VOC's Measured through Nasal Localization Threshold, Proceedings of Indoor Air 1996, Vol. 1, 1996, S. 167-172

¹² DIN EN 13725: Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration mit dynamischer Olfaktometrie, Beuth Verlag Berlin, 2003

¹³ Jensen, B.; Wolkoff, P.: VOCBASE: Odor Thresholds, Mucous Membrane Irritation Thresholds and Physico-Chemical Parameters of Volatile Organic Compounds, National Institute of Occupational Health, Denmark, 1996

nur 10^{-3} ppm liegt die Geruchsschwelle weit unterhalb des Messbereiches analytischer Verfahren.

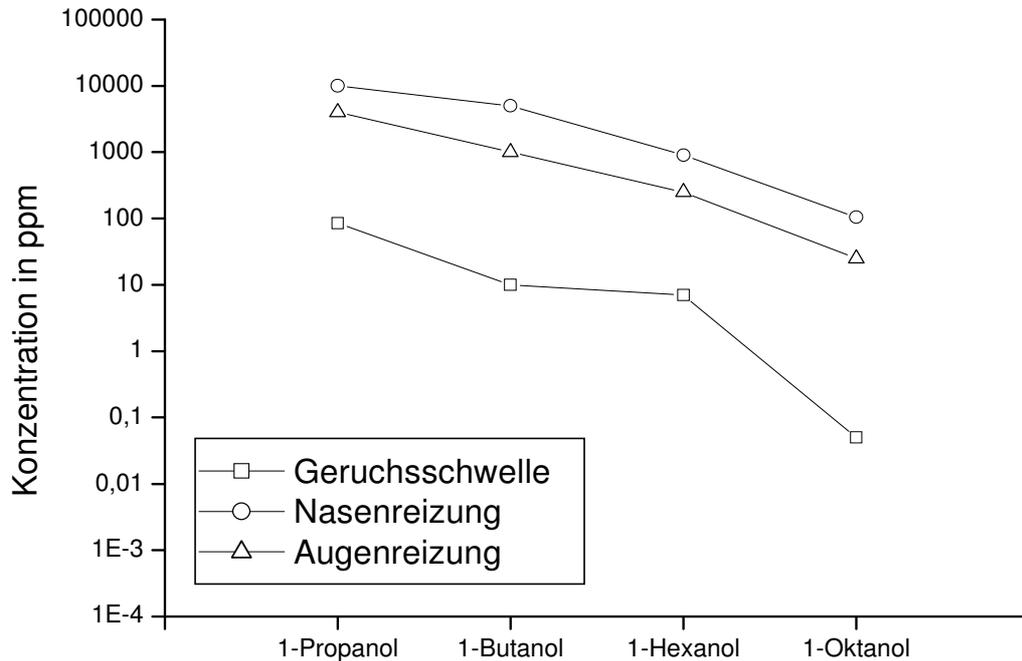


Abb. 6: Geruchs- und Reizschwellen aliphatischer Alkohole nach Cain et al. (Cain, 1996)¹¹

Die Eigenschaften der untersuchten Alkohole ändern sich mit der Molekülgröße. Dies gilt zumindest qualitativ auch für andere organische Geruchsstoffe. Fitzner (Fitzner, 1998)¹⁴ schloss aus anderen Untersuchungen, dass nicht nur die Geruchsschwelle, sondern auch andere Eigenschaften, wie Adsorption und Emission, von der Molekülgröße abhängen. Er stellte unter Bezug auf die Arbeiten von Wolkoff (Wolkoff, 1995)¹⁵ und Levsen et al. (Levsen, 1993)¹⁶ fest, dass viele Substanzen mit großem Molekulargewicht einen hohen Siedepunkt und damit einen niedrigen Dampfdruck haben. Dadurch werden sie langsamer emittiert, so dass die Quellstärke zwar gering ist, aber über lange Zeit erhalten bleibt. Außerdem werden sie an Oberflächen besser adsorbiert, so dass sekundäre Verunreinigungsquellen im Raum entstehen können.

Die genannten Untersuchungen zeigen, dass der Geruch als Indikator für das Vorhandensein flüchtiger organischer Komponenten in der Raumluft dienen kann.

¹⁴ Fitzner, K.: „Perceived Air Quality“ und Molekülgröße flüchtiger organischer Substanzen (VOC), VDI Berichte 1373, VDI Verlag Düsseldorf, 1998, S. 41-49

¹⁵ Wolkoff, P.: Volatile Organic Compounds – Sources, Emissions, and the Impact on Indoor Air Quality, Int. Journal of Indoor Air and Climate, 3/95, Munksgard, Copenhagen, 1995, S. 1-73

¹⁶ Levsen, K., Sollinger, S.: Textile Floor Coverings as Sinks for Indoor Air Pollutants, Proceedings of Indoor Air '93, Vol. 2, 1993, S. 395-400

Anhand der in Summe mit der Nase wahrnehmbaren Stoffe können die Luftqualität in Räumen, aber auch die Verunreinigungen der Luft durch Materialien und technische Anlagen von Personen bewertet werden.

Mit den Ergebnissen aus diesen Bewertungen der empfundenen Luftqualität ist es jedoch noch nicht möglich, die Außenluftvolumenströme für mechanisch belüftete Räume in Abhängigkeit von der bestehenden bzw. zu erwartenden Verunreinigungslast hinreichend genau zu errechnen. Ursachen dafür sind die große Anzahl an Einflüssen auf die Entstehung und Wahrnehmung von Gerüchen, die geringe Anzahl von Messdaten verschiedener Quellen sowie die noch nicht weitgehend genug bekannten Gesetzmäßigkeiten der Addition von Luftverunreinigungen.

2.3 Einfluss von Feuchte und Temperatur

Die Nase dient im menschlichen Organismus nicht nur zur Wahrnehmung von Geruchsstoffen in der Umwelt, sondern erfüllt auch im Atemapparat wichtige Aufgaben. Dort ist sie für die Klimatisierung der Einatemluft, also die Temperierung, die Be- und Entfeuchtung sowie die Reinigung, verantwortlich. Dazu dienen die Schleimhäute, mit denen die Nasenhöhle vollständig ausgekleidet ist. Die Geruchsrezeptoren liegen in den Schleimhäuten. Sie detektieren Geruchsmoleküle, die aus der Luft in die Schleimhaut diffundiert sind. Je nach Zustand der Einatemluft werden die Durchblutung und der Wassergehalt der Schleimhaut variiert, wodurch sich ihre Stärke verändert. Diese Schwankungen in der Dicke und der Zusammensetzung der Schleimhaut könnten einen Einfluss auf die Diffusion der Geruchsstoffmoleküle und damit auf die Wahrnehmung von Geruchsstoffen haben.

Die Abhängigkeit der Geruchsstoffwahrnehmung vom thermischen Zustand der Luft wurde von Fang (Fang, 1997)¹⁷ untersucht. Er stellte in seinen Untersuchungen fest, dass die empfundene Qualität der Luft von ihrer spezifischen Enthalpie abhängt. Je höher die Enthalpie der Luft war, desto schlechter wurde die Luftqualität bewertet. In den Versuchen setzte Fang untrainierte Personen ein, welche die Akzeptanz der Luft bewerteten. In Abb. 7 sind die Ergebnisse von Fang anhand der von ihm ermittelten stoffspezifischen Näherungsgeraden für die untersuchten Materialien dargestellt. Die Geraden beschreiben den Zusammenhang zwischen der Akzeptanz und der spezifischen Enthalpie der Luft.

¹⁷ Fang, L.: Impact of Temperature and Humidity on Perceived Indoor Air Quality, Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, Copenhagen, 1997

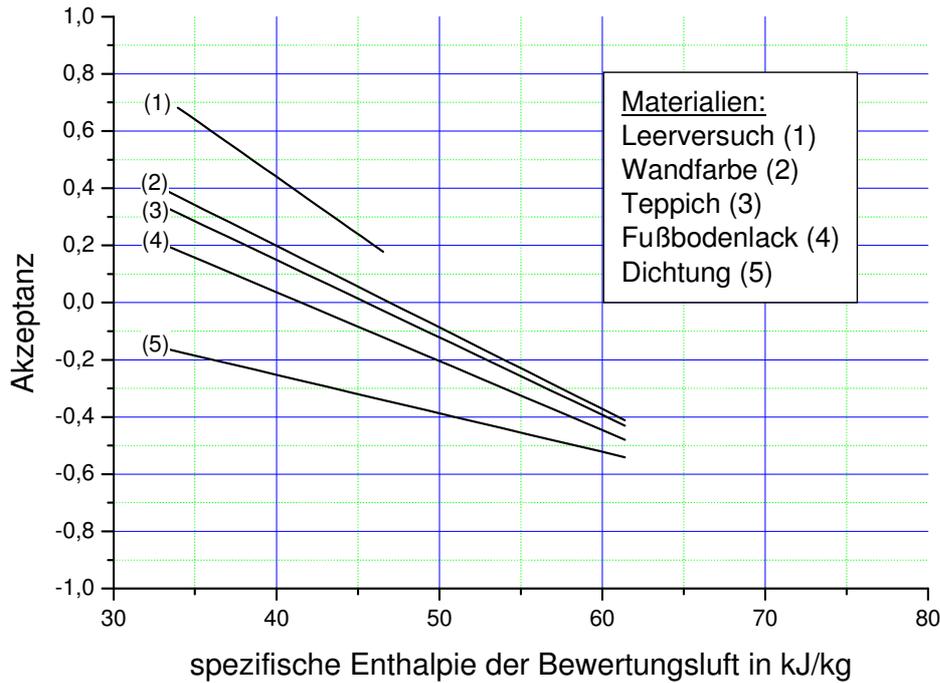


Abb. 7: Zusammenhang zwischen der spezifischen Enthalpie der Luft und Akzeptanz nach Fang (Fang, 1997)¹⁷

Die Enthalpie der Luft wurde in zwei getrennten Versuchsreihen variiert. In der ersten Versuchsreihe wurde die Enthalpie bei konstanter Feuchte durch Änderung der Lufttemperatur beeinflusst und in der zweiten Versuchsreihe durch Änderung des Feuchtegehalts der Luft bei konstanter Temperatur. Für alle untersuchten Stoffe ergab sich eine Verschlechterung der Akzeptanzwerte mit zunehmender spezifischer Enthalpie der Bewertungsluft. Die Art der Enthalpievariation hatte auf das Versuchsergebnis keinen Einfluss.

3 Geruchsstoffe

3.1 VOCs

In Innenräumen sind zahlreiche flüchtige organische Substanzen (VOC – volatile organic compounds) zu finden. Diese stammen aus Einrichtungsgegenständen, Baumaterialien, Zuluft und von Personen. Die VOCs werden gemäß ihrer Siedetemperaturen in Klassen eingeteilt.

Klasse	Bezeichnung	Abk.	Bereich des Siedepunkts
1	leichtflüchtige organische Substanz	VVOC	<0 bis 50-100 °C
2	Flüchtige organische Substanz	VOC	50-100 bis 240-260 °C
3	Schwerflüchtige organische Substanz	SVOC	240-260 bis 380-400 °C
4	an Partikel gebundene organische Substanz	POM	> 380 °C

Tab. 1: Einteilung von VOCs in vier Klassen

3.2 Mikroorganismen

Die Lebewesen der Erde werden aufgrund ihrer morphologischen und ernährungsphysiologischen Eigenschaften in Pflanzen und Tiere unterteilt. Man bezeichnet die photosynthetisierenden Pflanzen als phototroph, die tierischen Lebewesen als heterotroph. Neben den Pflanzen und Tieren haben sich Mikroorganismen in der Evolution aus gemeinsamen Vorstufen des Lebens entwickelt. Sie gehören weder zu den Pflanzen, da sie nicht in der Lage sind zu photosynthetisieren, und sie gehören noch zu den Tieren, da sie keine Organe haben, die zur Nahrungsaufnahme von organisch fixierter Energie dienen.

Aufgrund ihres Zellaufbaus werden Mikroorganismen in höhere und niedere Protisten unterteilt. Die niederen Protisten besitzen keinen Zellkern mit einer Membran. Die DNA liegt als ringförmiges Molekül frei im Zytoplasma. Zu den niederen Protisten zählen die Bakterien (Prokaryonten). Bei den höheren Protisten enthält der von einer Doppelmembran umgrenzte Zellkern das genetische Material. Zu ihren Vertretern gehören die Pilze (Eukaryonten).

Mikroorganismen werden wissenschaftlich mit zwei Namen charakterisiert, die aus dem Lateinischen oder Griechischen stammen. Der erste Name bezeichnet die Gattung (Genus), der zweite die Art (Spezies). Für den Pilz *Aspergillus Niger*

charakterisiert *Aspergillus* die Gattung und *Niger* die Art innerhalb der Gattung der *Aspergillen*.

Mikroorganismen kommen in der Natur praktisch überall vor. Sie sind ein wichtiges Glied in der Nahrungskette, da sie abgestorbenes, organisches Material abbauen und selbst anderen Organismen wieder als Nahrungsquelle dienen. Während des Wachstums können Mikroorganismen Stoffwechselprodukte (z.B. Mykotoxine, Antibiotika, Allergene) abgeben, die für Menschen gesundheitsschädlich oder belästigend sein können.

3.3 Pilze

Das Reich der Pilze (engl.: fungi) umfasst eine große Formenvielfalt von mehr als 120.000 Arten. Die eukaryontische Zelle der Pilze ähnelt in ihrem Aufbau mehr den Pflanzen als den Bakterien, obwohl sie vollkommen kohlenstoffheterotroph ist. Von den Bakterien unterscheiden sich Pilze durch das Vorkommen eines echten Zellkerns.

Pilze wachsen entweder als Einzelzellen (Hefen, engl.: yeasts) oder als multizelluläre Kolonien (Schimmelpilze, engl.: moulds). Charakteristisch für die Pilze ist die Arbeitsteilung zwischen vegetativen und reproduktiven Organen. Die vegetativen Organe bestehen entweder aus fadenartigen Zellen, den Hyphen, oder aus runden bis ovalen Sproßzellen, die Ernährung und Wachstum im Nährsubstrat sichern. Durch Volumenzunahme hinter der Spitze wachsen die Hyphen in der Länge. Durch seitliche Ausstülpungen entstehen Seitenhyphen, d.h. echte Verzweigungen und damit ein Hyphengeflecht (Myzel). Einige Pilze teilen die Hyphen durch Septen in einzelne Zellen auf.

Der Lebenszyklus von Pilzen beinhaltet 2 Phasen der Fortpflanzung, die generative (sexuelle) und die vegetative (asexuelle) Phase. Pilze, von denen beide Fortpflanzungsphasen bekannt sind, werden als perfekte Pilze klassifiziert. Ist nur die asexuelle Phase bekannt, bezeichnet man sie als imperfekt.

Die reproduktiven Organe der Pilze bezeichnet man als Sporen. Sie werden als Konidien an der Spitze spezieller Hyphen oder als Sporangiosporen innerhalb sackartiger Strukturen am Ende spezieller Hyphen gebildet. Sexuelle Sporen entstehen als Endprodukt nach dem Fusionieren zweier Zellkerne.

Sporen sind eine Dauerform der Pilze und kommen überall in der Umwelt vor. Sie können längere Zeiträume unter ungünstigen Bedingungen überdauern. Bei günstigen klimatischen Bedingungen und ausreichendem Nährstoffangebot bilden die Sporen das Zentrum von neuen Pilzkolonien.

Das Wachstum fast aller Pilzarten ist abhängig von der Verfügbarkeit von Wasser. Die relative Luftfeuchtigkeit oder die Wasseraktivität muss dazu möglichst hoch sein. Unter der Wasseraktivität a_w versteht man

$$a_w = \frac{p_{d,M}}{p_{d,0}} \quad (\text{Gl. 4})$$

mit: $p_{d,M}$: Dampfdruck des Wassers im Nährsubstrat

$p_{d,0}$: Dampfdruck des reinen Wasser.

Pilze lassen sich aufgrund ihrer bevorzugten Feuchtigkeitsbedingungen in xerophile, mesophile und hydrophile Spezies unterteilen. Xerophile Pilze bevorzugen eine trockene Umgebung, hydrophile Pilze hingegen benötigen sehr hohe a_w -Werte von über 0,95.

Im Gebiet der Heizungs- und Klimatechnik gibt es häufig dann Probleme mit Pilzen, wenn die Luft in geschlossenen Räumen zu feucht ist. In der Regel sind somit zu geringe Außenluftstraten gekoppelt mit Wärmebrücken die Ursache für das Wachstum von Pilzen. In Tab. 2 wird eine Aufstellung der in feuchten Räumen vorkommenden Arten angegeben.

Art	Vorkommen
<i>Alternaria alternata</i>	feuchte Wände, feuchte Fensterbretter
<i>Aspergillus versicolor</i>	feuchtes Holz
<i>Aureobasidium pullulans</i>	
<i>Cladosporium herbarum</i>	feuchte Wände, feuchte Fensterbretter
<i>Cladosporium cladosporioides</i>	feuchte Wände, feuchte Fensterbretter
<i>Cladosporium sphaerospermum</i>	feuchte Wände, feuchte Fensterbretter
<i>Eurotium repens</i>	Möbel, Tapeten
<i>Penicillium brevicompactum</i>	feuchte Rigipsplatten
<i>Penicillium chrysogenum</i>	feuchte Tapete, hinter Farbanstrichen
<i>Penicillium expansum</i>	Rigips, Mineralwolle
<i>Rhodotorula spp</i>	feuchte Kellerwände
<i>Stachybotris chartarum</i>	Rigipsplatten
<i>Trichoderma viride</i>	feuchtes Holz

Tab. 2: Einige Pilzarten, die häufig in feuchten Gebäuden auftreten

In der Außenluft und in der Raumluft von Gebäuden sind luftgetragene Pilze enthalten. In Tab. 2 sind einige der am häufigsten vorkommenden Arten aufgelistet. Diese Arten sedimentieren im Hausstaub und können dort ebenfalls nachgewiesen werden. Einige Pilzarten können Allergien auslösen und zu Asthmaanfällen oder bei längerer Exposition zu chronischem Asthma führen.

4 Probennahme- und Darbietungsverfahren

4.1 Probennahme

Es können zwei Arten der Probenahmen unterschieden werden: die statische Probenahme (indirekte Probenahme) und die dynamische Probenahme (direkte Probenahme, Online-Messung).

Statische Probenahme

Bisher ist im Bereich der empfundenen Luftqualität keine Messmethode mit der Möglichkeit der statischen Probennahme definiert worden. Eine statische Probenahme erfordert ein System zur geruchsneutralen Lagerung von Luftproben. Das Hermann-Rietschel-Institut hat ein erstes Gerät dieser Art entwickelt, siehe AirProbe I.

Dynamische Probenahme

Die Probenahme erfolgt direkt an der Geruchsquelle. Die Umgebungsbedingungen können das Messergebnis störend beeinflussen. Die Probennahme ist hierbei mit der Probendarbietung gekoppelt und wird im nachfolgenden Kapitel beschrieben. Die Lagerung der Proben entfällt.

4.1.1 Direktbewertung von Räumen

Die Probanden betreten den zu beurteilenden Raum und müssen sofort eine Bewertung für die empfundene Luftqualität abgeben. Nachteil dieser einfachen Methode ist, dass die Probanden aufgrund der sie umgebenden Reize wie Personen, Einrichtung und Nutzungsart des Raumes eine Erwartungshaltung entwickeln, die sich auf die Bewertung der Raumluftqualität auswirken kann. Außerdem erfolgt auf dem Weg zu einem Raum durch einen Gebäudekomplex eine Adaption an den Grundgeruch des Gebäudes.

4.1.2 FLEC-Verfahren

Das FLEC-Verfahren (Field and Laboratory Emission Cell) wurde 1991 in Dänemark von Peter Wolkoff am Danish National Institute for Occupational Health entwickelt. Die Besonderheit dieser Messkammer besteht darin, dass das zu testende Material (z.B. Möbeloberflächen) zum Boden der Kammer wird. Somit kann FLEC in Gebäuden oder in Produktionshallen eingesetzt werden, um einzelne Baustoffemissionen zu bestimmen, ohne die Baukonstruktion zu zerstören. Außerdem wird bei der Analyse eines einzelnen Baustoffes eine Überlagerung mit im Raum befindlichen Emissionsquellen vermieden.

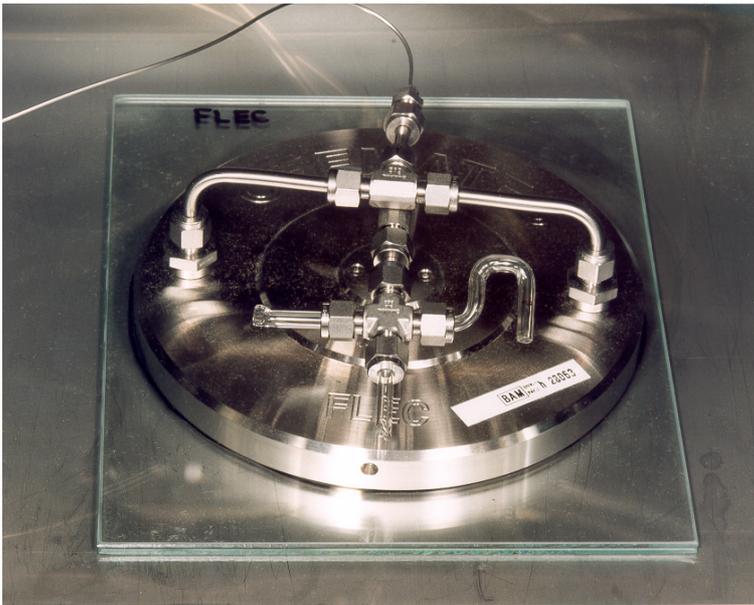


Abb. 8: Foto einer FLEC (Field and Laboratory Emission Cell)

Die runde FLEC (Feld und Labor Emissionszelle) hat einen Außendurchmesser von 20 cm und besteht aus massivem Edelstahl. Mit einer Höhe von 2 cm (ohne Anschlüsse) wiegt die FLEC 4 kg und umfasst mit der Unterseite ein Kammervolumen von nur 35 cm³. Der Boden der FLEC lässt eine Fläche von 177 cm² für das Testmaterial offen. Die Anschlüsse für Zuluft und Abluft befinden sich auf der Oberseite der Zelle. Die Luft wird über einen schmalen Schlitz auf den gesamten Umfang der Zelle verteilt und in der Mitte wieder entnommen. Durch den Überdruck in der Zelle wird gleichzeitig eine Kontamination der Zelle von außen vermieden.

4.1.3 Emissionskammer (CLIMPAQ)

Ein CLIMPAQ ist eine spezielle Testkammer, die seit einigen Jahren weltweit verstärkt in Untersuchungen der empfundenen Luftqualität eingesetzt wird. Der Name „CLIMPAQ“ leitet sich aus dem Englischen ab und bedeutet „**C**hamber for **L**aboratory **I**nvestigations of **M**aterials, **P**ollution and **A**ir **Q**uality“. Die Testkammern wurden 1994 von Gunnarsen, Nielsen und Wolkoff an der Technischen Universität Dänemark in Kopenhagen entwickelt. Wie in allen Untersuchungen von Verunreinigungsquellen wurden zum Bau dieser Testkammern Materialien verwendet, die selbst nur eine äußerst geringe Quellstärke besitzen.

Seit 1999 werden diese Testkammern in leicht modifiziertem Aufbau auch am Hermann-Rietschel-Institut eingesetzt. Der Aufbau einer Kammer ist der Abb. 9 zu entnehmen. In der Abbildung ist die Strömungsrichtung der Luft durch Pfeile gekennzeichnet. Der Großteil der kinetischen Energie der Zuluft wird sofort nach Eintritt in die Kammer an einer Prallplatte abgebaut. Dahinter befindet sich das erste von zwei Laminarisorblechen. Dieses sorgt für eine gleichmäßige Vertei-

lung des Volumenstromes auf den gesamten Kammerquerschnitt. Die eigentliche Testkammer mit dem zu untersuchenden Material ist der Raum zwischen den beiden Laminarisatoren.

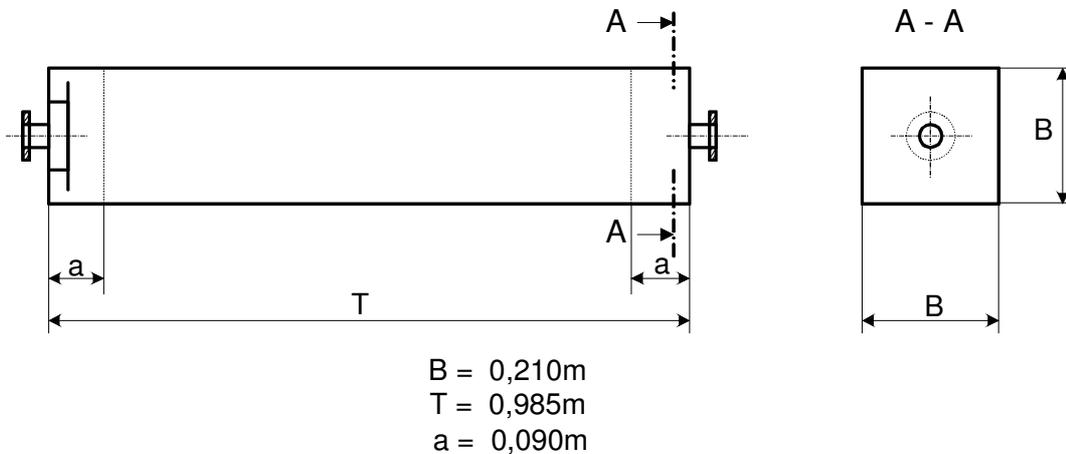


Abb. 9: Aufbau einer Testkammer

Am Ausgang der Testkammer ist die Luft durch das zu untersuchende Material verunreinigt. Diese belastete Luft wird von einem trainierten Geruchspanel entweder direkt oder nach Verdünnung mit unbelasteter Luft bewertet. Die Kammern finden Verwendung in Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der Konzentration von einzelnen Geruchsstoffen oder Geruchsstoffkombinationen und ihrer Wahrnehmung durch den Menschen. Mit Hilfe dieser Untersuchungen können materialspezifische Kennlinien, die den gesuchten Zusammenhang beschreiben, ermittelt werden. Der Versuchsaufbau zur Ermittlung von Geruchsstoffkennlinien ist der folgenden Abbildung zu entnehmen.

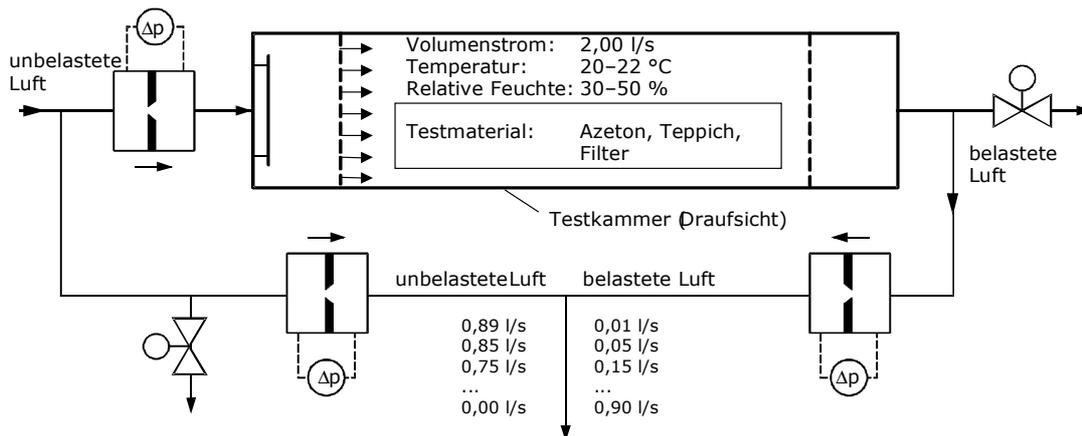


Abb. 10: Versuchsaufbau in Einzelstoffuntersuchungen

Die Untersuchungen von Geruchsstoffkombinationen dienen der Ermittlung von Rechenregeln für die empfundene Luftqualität, mit denen die Bestimmung der zu erwartenden Luftqualität in einem Raum bei Vorhandensein mehrerer Verunreinigungsquellen anhand der Daten für die Einzelstoffe möglich ist (Böttcher,

2003)¹⁸. Daraus lässt sich der zur Beseitigung der Verunreinigungslast erforderliche Außenluftvolumenstrom bestimmen.

4.1.4 AirProbe I

Das AirProbe I ist ein Probenahme- und Probendarbietungssystem das 2001 am Hermann-Rietschel-Institut entwickelt wurde (Müller, 2002)¹⁹. Es dient zum Befüllen und Entleeren von Probenahmebeuteln aus Polymerfolien. Pumpen können aufgrund von Eigenemissionen oder Emissionen aus Schmierstoffen die Luftprobe verändern. In der Pumpe oder an den Wandungen der Verbindungsleitungen können Adsorptions- bzw. Desorptionsvorgänge stattfinden, welche die Luftprobenzusammensetzung beeinflussen. Bei dem AirProbe I wird deshalb keine Pumpe zur Förderung der Probenluft installiert und die Zu- und Ableitungen werden kurz gehalten. Für die Förderung der Luft sind im Gehäuse stattdessen zwei Ventilatoren integriert. Je ein Ventilator erzeugt im Gehäuse einen Unter- oder Überdruck und füllt oder entleert so den Probenbehälter. Der Probennahmebehälter ist im Gehäuse an einem kurzen Edelstahlrohr befestigt, über das die Probenluft in den Probenbehälter gelangt. Bei der Probendarbietung wird die Luft auf dem entgegengesetzten Wege nach außen gefördert. Abb. 11 zeigt die Prinzipskizze des Probennahmegerätes „AirProbe I“.

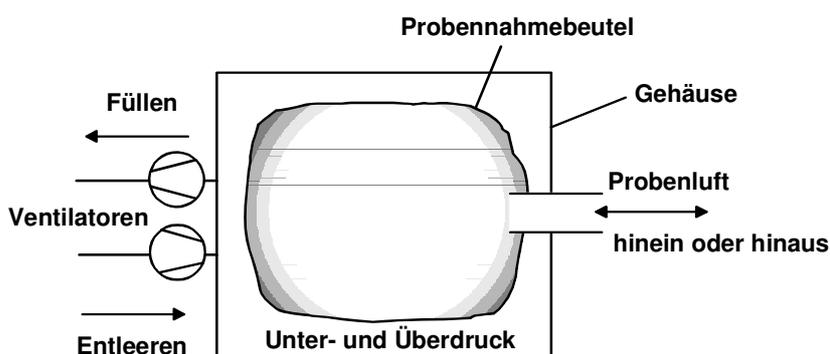


Abb. 11: Prinzipskizze des Probennahmegerätes

Abb. 12 und Abb. 13 zeigen Fotos des entwickelten Probennahme- und Darbietungsgerätes. Das Gehäuse ist 700 mm breit x 700 mm tief und 600 mm hoch. Dies entspricht einem Volumen von 294 Litern. Dieses Volumen wird benötigt, um bei einer Probandengruppe von 10 Personen ausreichend Probenluft zur Verfügung stellen zu können.

¹⁸ Böttcher, O.: Experimentelle Untersuchungen zur Berechnung der Empfindenen Luftqualität, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2003

¹⁹ Müller, B.: Entwicklung eines Gerätes zur Entnahme und Darbietung von Luftproben zur Bestimmung der empfundenen Luftqualität, Fortschritt-Berichte VDI, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002

Bei der Wahl der Größe ist darauf geachtet worden, dass das Gerät gut allein oder zu zweit handhabbar ist und durch normale Türen passt. Das hier abgebildete Probennahmegerät ist aus laminiertem Sperrholz gefertigt. Für weitere Geräte dieser Art sollten emissionsarme und leichte Materialien, wie Aluminium, gewählt werden. Zum einen sind leichtere Geräte besser zu handhaben und zum anderen ist es nicht auszuschließen, dass von dem Gerät Stoffe in den Probenbehälter permeieren können.



Abb. 12: Probenentnahme- und Probendarbietungsgerät AirProbe I

In Abb. 12 ist das Probendarbietungsgerät mit Riechtrichter abgebildet. Am Riechtrichter können die Probanden die Probenluft bewerten. Die Verbindung vom Trichter zum Gehäuse besteht aus Edelstahl. Sie dient auch zur Probennahme. Der Trichter mit dem T-Stück wird dafür abgenommen. So entsteht eine Öffnung, durch welche die Luft einströmt.



Abb. 13: Ansicht der Ventilatoren an dem Probennahmegerät, die einen Über- oder Unterdruck in dem Gehäuse erzeugen können

In Abb. 13 sind zwei regelbare Ventilatoren an der Rückwand des Gehäuses zu erkennen. Die Pfeile auf den Ventilatoren zeigen an, ob die Luft in das Gehäuse gedrückt oder herausgesaugt wird. Durch den Gehäusedeckel aus Plexiglas kann der Füllstand des Probenbehälters beobachtet werden.

Wie sich bei den Untersuchungen herausgestellt hat, ist das Volumen dieses Gerätes ausreichend, um einen Versuchsdurchgang mit zehn Probanden durchzuführen. Vor der Arbeit der Probanden an diesem Gerät ist darauf hinzuweisen, dass die Messung zügig durchgeführt werden soll.

4.2 Probenlagerung

Werden Proben nicht direkt genommen und erst später ausgewertet bzw. bewertet, kommt der Lagerung der Proben eine große Bedeutung bei. Hierfür müssen die Umgebungsbedingungen beachtet werden.

Bezüglich der Probennahme und Probenaufbewahrung sind für die VDI 3881²⁰ eigene Anforderungen entwickelt worden. Die Norm unterscheidet zwischen dynamischer (vor-Ort Probennahme und -auswertung) und statischer Probennahme, bei der die Geruchsstoffprobe in einen geeigneten Behälter/Folienbeutel gezogen wird. Das zur Messung mit dem Olfaktometer benötigte Probenvolumen hängt im Wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

- Geruchsstoffkonzentration,
- Luftdurchsatz,
- Größe der Probandengruppe,
- Art und Anzahl der Messreihen.

Für eine einfache Geruchsschwellenuntersuchung am Olfaktometer TO7 werden so mindesten acht Liter Probenluft benötigt. Die Verweilzeit der Probe zwischen Probennahme und Messung sollte möglichst kurz sein und 24 Stunden nicht überschreiten. Veränderungen der Probe können durch Olfaktometermessungen nach unterschiedlichen Verweilzeiten überprüft werden. Besser geeignet ist jedoch eine chemische Analyse mit der Gaschromatographie.

An das Material der Probenbeutel werden folgende Anforderungen gestellt:

- geruchsneutral,

²⁰ VDI 3881, Blatt 2: Olfaktometrie. Geruchsschwellenbestimmung: Probennahme, VDI-Richtlinie, Beuth Verlag, 1987; Juli 2003 durch DIN EN 13725 ersetzt

- chemisch inert,
- minimale Adsorptionsneigung gegenüber Geruchsstoffen,
- minimale Durchlässigkeit gegenüber Geruchsstoffen,
- Lichtundurchlässigkeit für den Fall, dass die zu prüfende Probe lichtempfindlich reagiert,
- mechanisch belastbar,
- schweißbar.

Die VDI 3881 führt einige mögliche Materialien für Probenahmebehälter auf, die sich in den Untersuchungen von Müller²¹ als ungeeignet für die Aufbewahrung von Probenluft herausstellen. Das Hermann-Rietschel-Institut setzt zur kurzfristigen Probenaufbewahrung Folien aus PTFE ein, für längerfristige Lagerung hat sich vorbehandeltes TEDLAR[®] als am besten geeignet erwiesen. Die Wiederverwendung von Probenbeuteln aus TEDLAR[®] ist nach sorgfältigem Ausheizen möglich.

4.3 Probendarbietung

4.3.1 Notwendige Luftmengen

Um eine einwandfreie Geruchsbewertung zu gewährleisten, müssen die Konstruktion des Trichters und die Probenluftmenge aufeinander abgestimmt sein.

Laut Silbernagel et al. (Silbernagel, 1991)²² atmet der ruhende Mensch rund 15 mal in der Minute und atmet dabei ein Volumen von 7,5 l/min ein. Das bedeutet, dass der Mensch durchschnittlich ein Atemzugvolumen von 0,5 l hat. Dieses Volumen muss dem Probanden während der Versuche mindestens zur Verfügung gestellt werden.

Knudsen (Knudsen, 1994)²³ untersuchte die Bewertung der empfundenen Luftqualität in Abhängigkeit vom Volumenstrom an der Nase der Probanden bzw. am Ausgang des Trichters. Er ließ dazu Probanden an einer Probe mit einer Geruchsbelastung von 10 dezipol riechen und variierte den Volumenstrom von 0,2 bis 1,5 l/s.

²¹ Müller, B.: Entwicklung eines Gerätes zur Entnahme und Darbietung von Luftproben zur Bestimmung der empfundenen Luftqualität, Fortschritt-Berichte VDI, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002

²² Silbernagel, S.; Despopoulos, A.: Taschenbuch der Physiologie, Thieme Verlag, 4. Auflage, 1991

²³ Knudsen, H. N.: Modelling af indeluftkvalitet, PhD Thesis, Technical University of Denmark, 1994

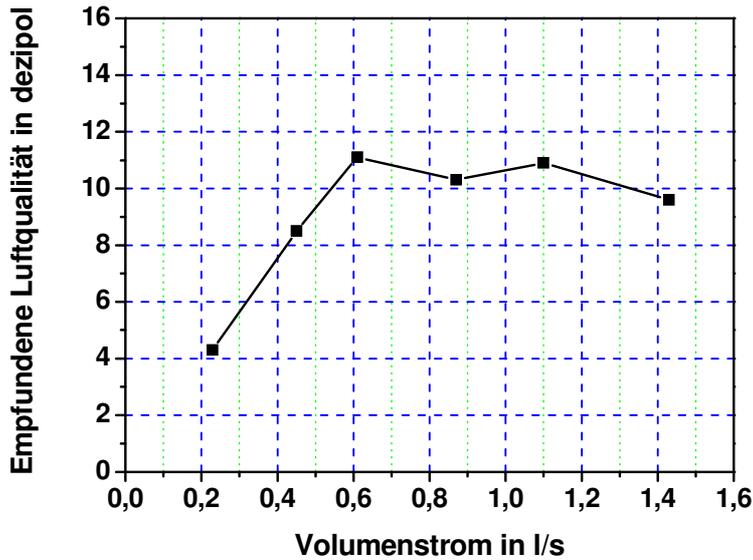


Abb. 14: Untersuchung von Knudsen (Knudsen, 1994) zum Einfluss des Volumenstroms auf die Bewertung der empfundenen Luftqualität

Die Untersuchung zeigte, dass die Bewertung der empfundenen Luftqualität erst ab einem Volumenstrom von ca. 0,5 l/s bis 0,6 l/s am Trichterausgang im Sinne der Messgenauigkeit konstant wird. Bei kleineren Volumenströmen ist eine genaue Beurteilung der empfundenen Luftqualität nicht möglich.

Üblicherweise wird ein Volumenstrom von 0,9 bis 1 l/s am Trichterausgang der Meilensteine und Proben eingestellt.

4.3.2 Bewertungstrichter

Die Probandengruppen müssen im Luftqualitätslabor Proben aus unterschiedlichen Quellen bewerten. Dezipolmeter, CLIMPAQ und AirProbe I sind so konstruiert, dass sie ca. 3 m³/h Probenluft zur Verfügung stellen können. Um eine einheitliche Bewertung der Probenluft zu gewährleisten setzt das Hermann-Rietschel-Institut für die unterschiedlichen Quellen Glastrichter ein. Glas emittiert selbst keine bzw. vernachlässigbar geringe Mengen an Verunreinigungen in die Probenluft und zum anderen lagern sich an der Oberfläche nur geringe Mengen an Geruchsstoffen ab. Bei der Konstruktion der Messtrichter ist darauf geachtet worden, dass keine Umgebungsluft angesaugt wird und sich mit der Probenluft vermischen kann, siehe Abb. 15. Ein Öffnungswinkel von 12° gewährleistet eine gleichmäßige Ausströmung der Probenluft. Die Trichter haben eine obere Öffnung von ca. 80 mm Durchmesser, eine untere Öffnung von 23 mm Durchmesser und eine Länge von 310 mm.



Abb. 15: Bewertungstrichter für das Fanger-Verfahren

4.3.3 Luftqualitätslabor am Hermann-Rietschel-Institut

Der Grundriss des im Herbst 1997 fertig gestellten Labors ist in Abb. 16 dargestellt. Es besteht aus zwei miteinander verbundenen Kabinen. In der Prüfkabine nehmen die Versuchspersonen ihre Bestimmungen der Luftqualität vor. Die Aufenthaltskabine dient den Versuchspersonen als Aufenthaltsraum zwischen den Bestimmungen und zur Erholung ihres Geruchssinnes. In ihr findet keine Bestimmung der Luftqualität statt.

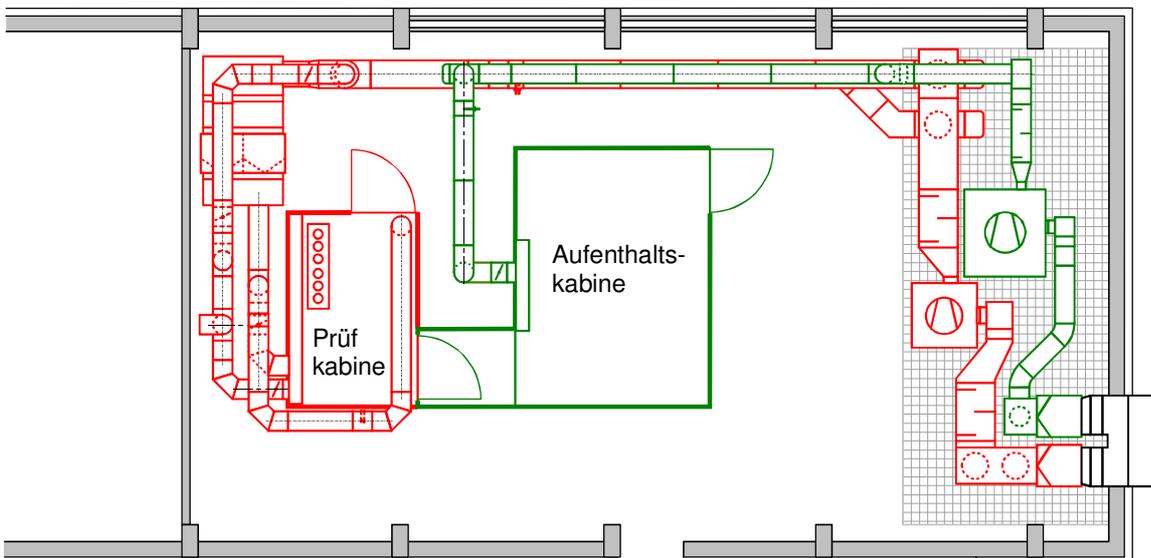


Abb. 16: Darstellung des Labors im Grundriss

In dem Labor werden das Training der Probanden und Laborversuche an Materialproben und Klimaanlagekomponenten durchgeführt. Die Messungen nach dem

VDI-Verfahren mit dem Olfaktometer werden ebenfalls in diesem Labor durchgeführt, da eine gute Umgebungsluft gewährleistet ist.

Der Innenraum der Prüfkabine hat eine Grundfläche von 2,0 m x 3,0 m und eine lichte Höhe von 2,0 m. Der Rahmen der Prüfkabine besteht aus Stahlprofilen. Die Wände sind aus Sicherheitsglas der Stärke 8 mm aufgebaut. Die Glasscheiben haben den Vorteil, dass sie sich gut reinigen lassen und nur sehr wenig bis keine Geruchsstoffe abgeben. In der Prüfkabine herrscht ein Überdruck, der durch den Zuluftvolumenstrom erzeugt wird. Die Fugen zwischen den Glasscheiben müssen daher nicht abgedichtet werden. Der Verzicht auf Abdichtungsmaterialien ist von Vorteil, da so eine zusätzliche Abgabe von Gerüchen vermieden wird. Auf ein Abluftsystem kann verzichtet werden, da die Luft aus der Prüfkabine aufgrund des Überdrucks durch die Undichtigkeiten in die Umgebung entweichen kann.

Die Aufenthaltskabine hat einen Innenraum mit einer Grundfläche von 2,80 m x 3,80 m und eine lichte Höhe von 2,05 m. Beide Kabinen sind durch einen 1,0 m x 1,60 m x 2,05 m großen Verbindungsgang miteinander verbunden. Durch eine Tür im Verbindungsgang wird während der Versuche ein Luftaustausch zwischen den Kabinen verhindert. Dies ist nötig, um die Geruchsstoffe aus der Prüfkabine von der Aufenthaltskabine der Versuchspersonen fernzuhalten. Eine zweite Tür ermöglicht den Betreuern einen einfachen Zugang zur Prüfkabine.

Das gesamte Zuluftsystem besteht aus Glasrohren. Sonstige Einbauten, wie z.B. Filtergehäuse, Drosselklappen und Übergangsstücke sind aus Edelstahl gefertigt. Auf Dichtungsmaterialien wurde verzichtet, um mögliche Verunreinigungen der Zuluft zu vermeiden. Die Zuluft zu den beiden Kabinen wird von zwei voneinander unabhängigen RLT-Anlagen gefördert. Bei beiden Zuluftanlagen kann der Volumenstrom, die Zulufttemperatur und die Zuluftfeuchte getrennt eingestellt und geregelt werden. Während der Untersuchungen werden die Aufenthalts- und die Prüfkabine auf eine Temperatur von 20°C und 50 % relative Luftfeuchtigkeit klimatisiert.

Die Außenluft wird für beide Anlagen in 6 m Höhe angesaugt. Beide RLT-Anlagen haben nach einem Wetterschutzgitter einen Vorfilter (F7 für die Prüfkabine und F5 für die Aufenthaltskabine). Nach dem Ventilator verzweigt sich die Zuluftleitung für die Prüfkabine aufgrund des benötigten großen Zuluftvolumenstrom in zwei Glasrohrleitungen mit einem Durchmesser von 400 mm. Beide Leitungen münden in einen Mischkasten, an den sich ein doppeltes Filtergehäuse anschließt. Das Filtergehäuse dient sowohl zur Filterung der Zuluft, als auch zur Untersuchung von neuen und gebrauchten Filtern aus RLT-Anlagen.

Die Beheizung und Kühlung der Zuluft erfolgt durch wasserdurchflossene Kapillarrohrmatten auf der Außenseite der Glasrohre. Zur Wärmeerzeugung wird

Fernwärme, zur Kühlung eine Kompressionskältemaschine eingesetzt. Um die Zulufttemperatur für beide Kabinen unabhängig voneinander regeln zu können, besitzt jede Zuluftanlage einen eigenen Wasserkreislauf. Zur Befeuchtung der Zuluft ist in jede Anlage ein Dampfbefeuchter eingebaut. Der Ventilator für die Aufenthaltskabine ermöglicht einen maximalen Luftvolumenstrom von 1.800 m³/h. Bei den meisten Versuchsreihen wurde ein Volumenstrom von 900 m³/h eingestellt, was einem 40-fachen Luftwechsel entspricht. Der Ventilator der Zuluftanlage hat einen maximalen Luftvolumenstrom von 2700 m³/h. Die Laufräder und die Gehäuse der Ventilatoren sind aus Edelstahl.

Über ein Display am Schaltschrank der Anlagen können die Sollwerte der Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit in den Kabinen eingegeben und die entsprechenden Istwerte abgelesen werden. Die Leistung der Ventilatoren kann über Frequenzumformer stufenlos verändert werden die Einstellung der Frequenzen erfolgt über Potentiometer am Schaltschrank.

Mittels einer elektronischen Messdatenerfassung werden Temperatur und Luftfeuchtigkeit in den RLT-Anlagen, den Kabinen und der Außenluft automatisch an einer Vielzahl von Messstellen erfasst.

4.3.4 Probendarbietung für das VDI-Verfahren

Das VDI-Verfahren arbeitet konstruktionsbedingt mit wesentlich geringeren Volumenströmen. Voraussetzung für einen schnellen Wechsel zwischen Probenluft und Reinluft (siehe Kapitel VDI-Verfahren) ist ein geringes Volumen des Bewertungstrichters. Das am Hermann-Rietschel-Institut eingesetzte Olfaktometer stellt am Bewertungstrichter einen Luftvolumenstrom von 1,2 m³/h zur Verfügung. Folglich sollte der Trichter so konstruiert sein, dass er in erster Linie die Nase umspült.

Das Hermann-Rietschel-Institut entwickelte für das Olfaktometer einen eigenen Nasaltrichter mit einer oberen Öffnung von ca. 40 mm, einer unteren Öffnung von 18 mm, einer Höhe von 110 mm und einem Öffnungswinkel von ca. 12°, siehe Abb. 17.

Die Konstruktion gewährleistet eine gleichmäßige, angenehme Anströmung der Nase und verhindert wirksam die Verdünnung durch Nebenluft.

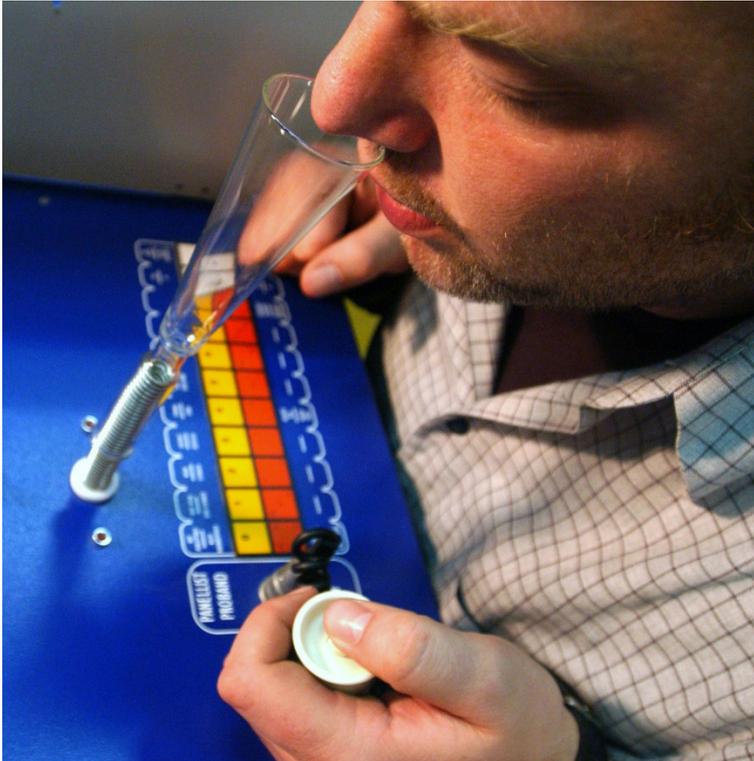


Abb. 17: Bewertungstrichter für das VDI-Verfahren

4.3.5 Dezipolmeter

Nach der Fanger-Methode werden die Proben für das Training (Azetonproben) aber auch Materialproben in sogenannten Dezipolmetern dargeboten. Ein Dezipolmeter besteht aus einem Glas, in dem sich die Probe befindet. Durch einen Ventilator wird die Luft aus der Box in das Glas gedrückt. Die Luft zirkuliert, nimmt dabei die Geruchsstoffe von der Probenoberfläche auf und entweicht über den Messtrichter. Am oberen Rand des Messtrichters wird die Bewertung der durch die Probe verunreinigten Luft vorgenommen. Die Azetonproben werden in kleinen Flaschen eingebracht. Durch definierte Öffnungen im Deckel dringt das Azeton in die Bewertungsluft. Die Größe und Anzahl der Löcher in dem Deckel der Glasflasche bestimmt die Menge an verdunstetem Azeton, das sich in dem großen Prüfglas mit Außenluft vermischen kann. Werden Materialproben untersucht, wird anstelle der Azetonflasche die Probe direkt in das Messglas eingelegt.

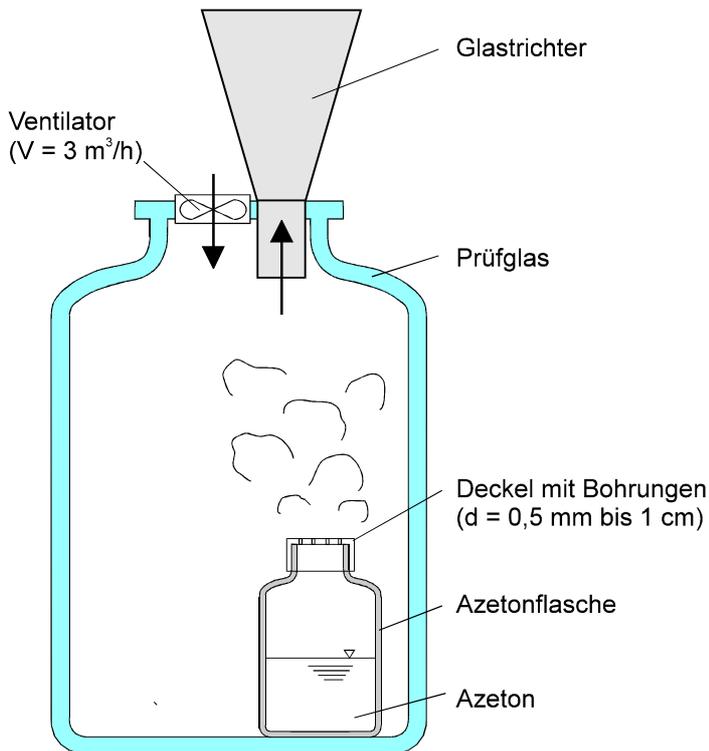


Abb. 18: Aufbau eines Dezipolmeters

Am Hermann-Rietschel-Institut haben die Prüfgläser ein Volumen von 5 l mit einem Durchmesser der oberen Öffnung von 8 cm. Diese Öffnung ist durch einen Kunststoffdeckel verschlossen, in dem sich ein Ventilator mit einer Förderleistung von $3 \text{ m}^3/\text{h}$ befindet.

4.4 Vergleichsmaßstab (Meilensteine)

Probanden können zur Beurteilung der empfundenen Intensität unbekannter Proben auf einen Vergleichsmaßstab aus Azeton/Luft-Gemischen, den so genannten Meilensteinen, zurückgreifen, die ihnen die Bestimmung der Intensität erleichtert.

Im Gegensatz zu der Akzeptanzmethode mit untrainierten Probanden wird durch den Vergleich mit verschiedenen vorgegebenen Intensitäten des Referenzstoffes Azeton die Intensität der in der Luft enthaltenen Geruchsstoffe bestimmt. Das Riechvermögen variiert von Mensch zu Mensch. Durch das Training und die Verwendung von Vergleichsquellen wird erreicht, dass der Einfluss der subjektiven Wahrnehmung auf das Versuchsergebnis reduziert wird, da alle Mitglieder der Versuchsgruppe die Qualität der Luft nach dem gleichen Maßstab bewerten.

Früher wurde der Vergleichsmaßstab mit den Dezipolmetern (siehe 4.3.5) dargeboten. Der heute verwendete Aufbau des Vergleichsmaßstabs wurde am Hermann-Rietschel-Institut neu entwickelt. Entwicklungsziel war eine konstant

einstellbare, von den Umgebungsbedingungen unabhängige Azetonkonzentration in der Probenluft. Der konstruktive Aufbau des Vergleichsmaßstabs ist in Abb. 19 dargestellt.

Die Meilensteine sind im Wesentlichen aus drei Teilen aufgebaut: Probenluftführung, Azetonquelle und Dosiereinrichtung. Die luftberührten Bauteile sind nahezu vollständig aus den weitgehend geruchsneutralen Materialien Edelstahl und Glas gefertigt.

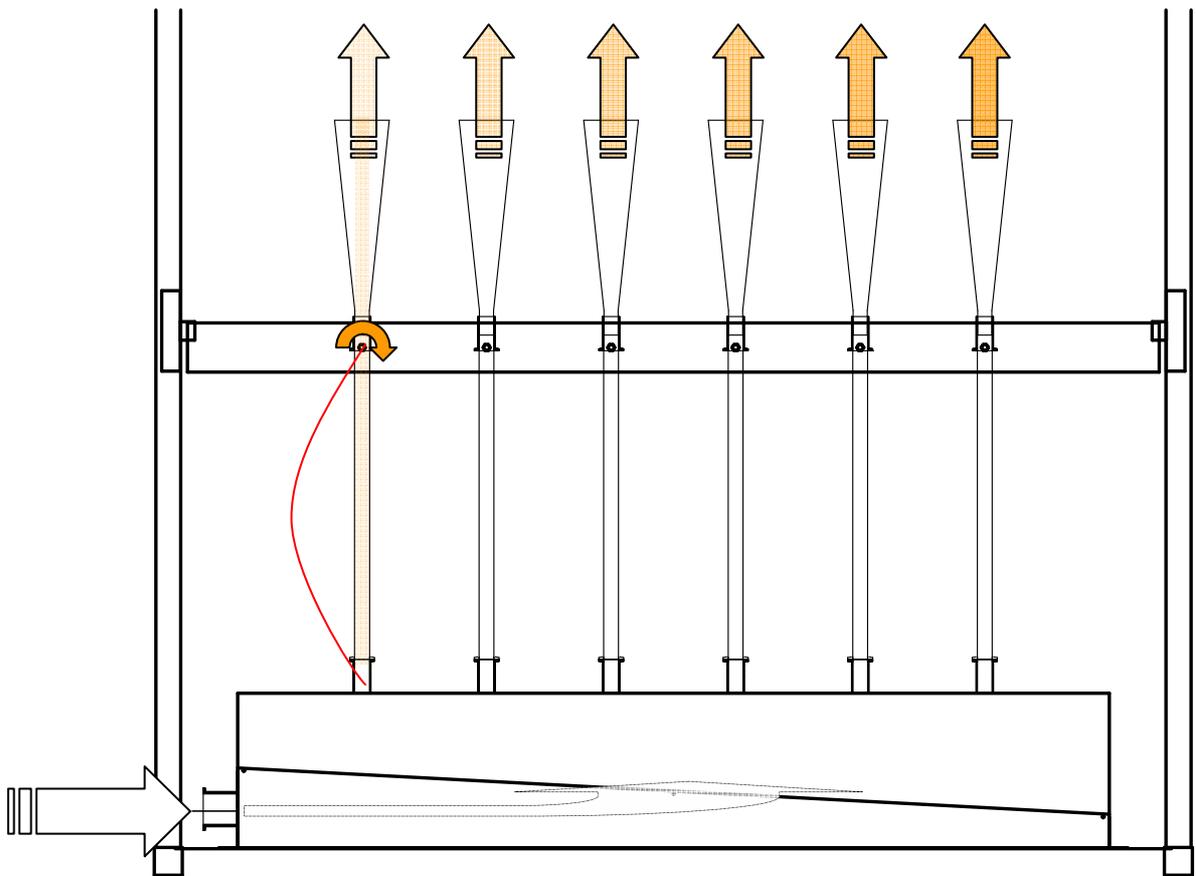


Abb. 19: Aufbau des Vergleichsmaßstabs

Die Probenluftführung ist über einen Flansch an eine geeignete, geruchsneutrale Luftversorgung angeschlossen. Für einen einwandfreien Betrieb müssen konstant zwischen 0,9 und 1,0 l/s pro Meilenstein (bei sechs Meilensteinen zwischen 5,4 und 6,0 l/s) durch die Probenluftführung gefördert werden. Die Konstant-Azetonquelle, bestehend aus einer druckfesten Waschflasche und einer Kühleinrichtung. Sie ist mindestens 9 Stunden vor Versuchsbeginn in Betrieb zu nehmen, um die Betriebstemperatur zu erreichen. Die Waschflasche wird mit synthetischer Luft versorgt.

Die Druckluft wird durch die mit Azeton gefüllte Waschflasche gefördert und angereichert. Die Kühlung verhindert eine Übersättigung der Druckluft und somit eine anschließende Kondensation im Leitungssystem. Über einen Zellulosefilter wird der Azetonnebel aus der angereicherten Luft wirksam abgeschieden.

Über eine Schlauchverteilung werden die insgesamt sechs Meilensteine mit dem konstanten Luft/Azetongemisch versorgt. Je ein Dosierventil regelt die der Probenluft zugeführte Menge des Azeton/Luft-Gemisches in einem Bereich von 0-1150 mg/m³.

Die Konstruktion der Zuführung gewährleistet eine gleichmäßige Durchmischung des Azetons in der Probenluft.

Ist die Versorgung des Meilensteins mit konstantem Luftvolumenstrom und konstanter Druckluft sichergestellt, wird die gewünschte Azetonmenge über die Dosierventile eingestellt. Die Einregulierung auf die gewünschten Einstellwerte nimmt beim ersten Mal etwas Zeit in Anspruch. Die eingestellten Konzentrationen sind mit einem geeigneten Messgerät zu überprüfen. Werden die Abstufungen des Meilensteins für die Dauer mehrerer Versuchstage nicht verändert, verringert sich der Zeitaufwand für die Einregulierung beträchtlich.

5 Personengebundene Messverfahren

Bei den personengebundenen Luftqualitätsmessungen wird das menschliche Empfinden als wesentlicher Maßstab für die Bewertung der Luftqualität definiert. Dabei dient die Nase als Messinstrument. Da das Riechempfinden von den subjektiven Erfahrungen jedes Einzelnen geprägt ist, werden zur Übertragung der Befragungsergebnisse auf die Allgemeinheit je nach Messverfahren unterschiedlich große Probandengruppen benötigt.

Für Versuche mit untrainierten Probandengruppen wird eine relativ große Anzahl (>40) von Probanden benötigt, während bei Versuchen mit trainierten Probandengruppen mit weit weniger Probanden (~10) statistisch gesicherte Ergebnisse erzielt werden können.

5.1 Fanger-Methode

Fanger entwickelte eine Methode mit Testpersonen zur Bestimmung der Luftqualität in Innenräumen. Hierfür führte er zur quantitativen Bestimmung zwei neue Größen mit Einheiten ein. Die Verunreinigungslast G wird in der Einheit olf (griechisch: Olfactus) angegeben (Fanger, 1988)²⁴. Hierbei entspricht ein olf der Verunreinigungslast durch eine Standardperson. Da die Verunreinigung durch Personen von der Aktivität, der Bekleidung und der Hygiene abhängt, definierte er für eine Standardperson einen gesunden Erwachsenen bei behaglicher Raumtemperatur mit einem Hygienestandard von 0,7 Bädern/Tag bei sitzender Tätigkeit. Die Verunreinigungslast ist jedoch nicht direkt messbar, sondern wird über die empfundene Luftqualität C hergeleitet. Diese wird in der Einheit Pol (lat. Pollutio) angegeben.

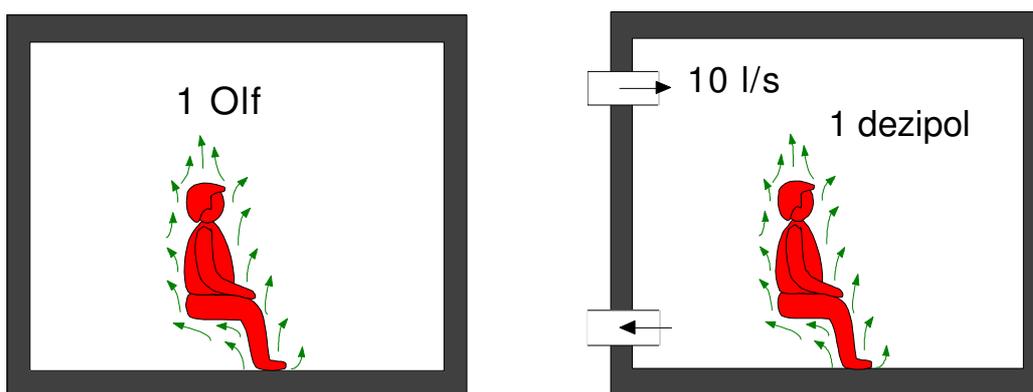


Abb. 20: Darstellung der Einheiten olf und dezipol

²⁴ Fanger, P.O: Introduction of the Olf and Decipol Units to Quantify Air Pollution Perceived by Humans Indoors and Outdoors, Energy and Buildings, 12, 1988, S. 1-6.

Ein Pol entspricht der empfundenen Luftqualität bei einer Verunreinigungslast von einem olf und einer Belüftung von 1 l/s. Zur Bewertung von Raumluftqualitäten ist 1/10 der Einheit, ein dezipol, geeigneter:

$$1 \text{ Dezipol} = 0,1 \frac{\text{Olf}}{\text{l/s}} \quad (\text{Gl. 5})$$

Die empfundene Luftqualität bestimmt sich so aus der Verunreinigungslast zu

$$C = C_{\text{Au}} + 10 \cdot \frac{\sum G}{\dot{V}} \quad (\text{Gl. 6})$$

- mit
- C: Empfundene Luftqualität [dezipol]
 - C_{AU}: Empfundene Luftqualität der Außenluft [dezipol]
 - G: Verunreinigungslast [olf]
 - \dot{V} : Außenluftvolumenstrom [l/s]

Fanger ermittelte eine Beziehung zwischen der Anzahl Unzufriedener PD (Percentage Dissatisfied, PD) und der auf den Volumenstrom bezogenen Verunreinigungsquellen. Er verwendete eine untrainierte Probandengruppe. Der ermittelte Zusammenhang ist in Abb. 21 dargestellt.

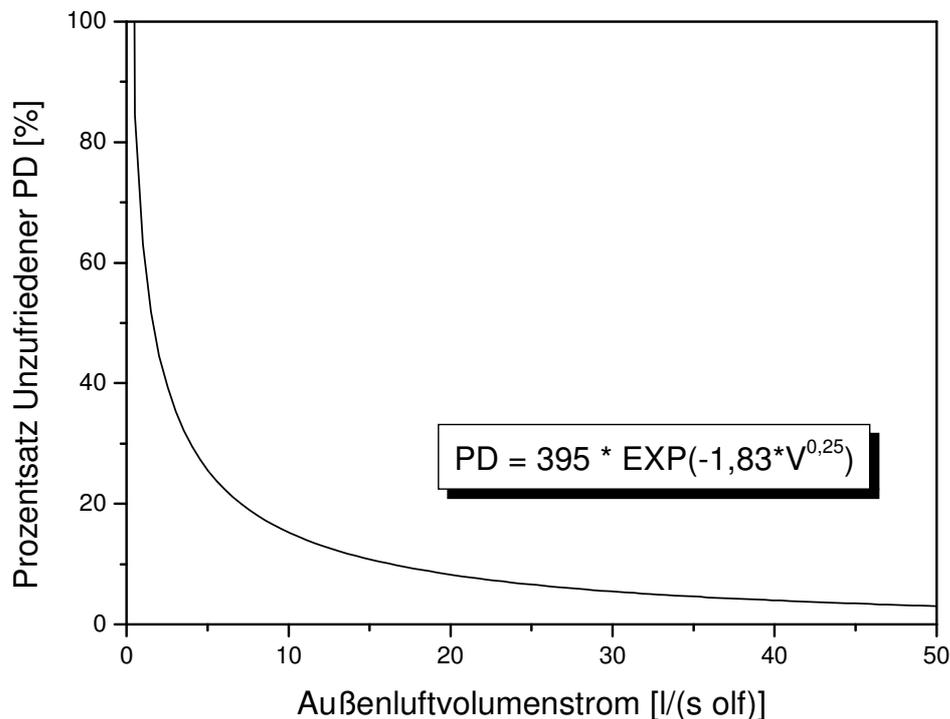


Abb. 21: Abhängigkeit des Prozentsatzes Unzufriedener von der personenbezogenen Außenluftfrate

Unter der Annahme des Zusammenhangs zwischen olf und dezipol aus der Definitionsgleichung, erhält man folgende Beziehung zwischen der Empfundene Luftqualität (C) und der Anzahl Unzufriedener (PD):

$$PD = 395 \cdot \text{EXP}(-3,25 \cdot C^{-0,25}). \quad (\text{Gl. 7})$$

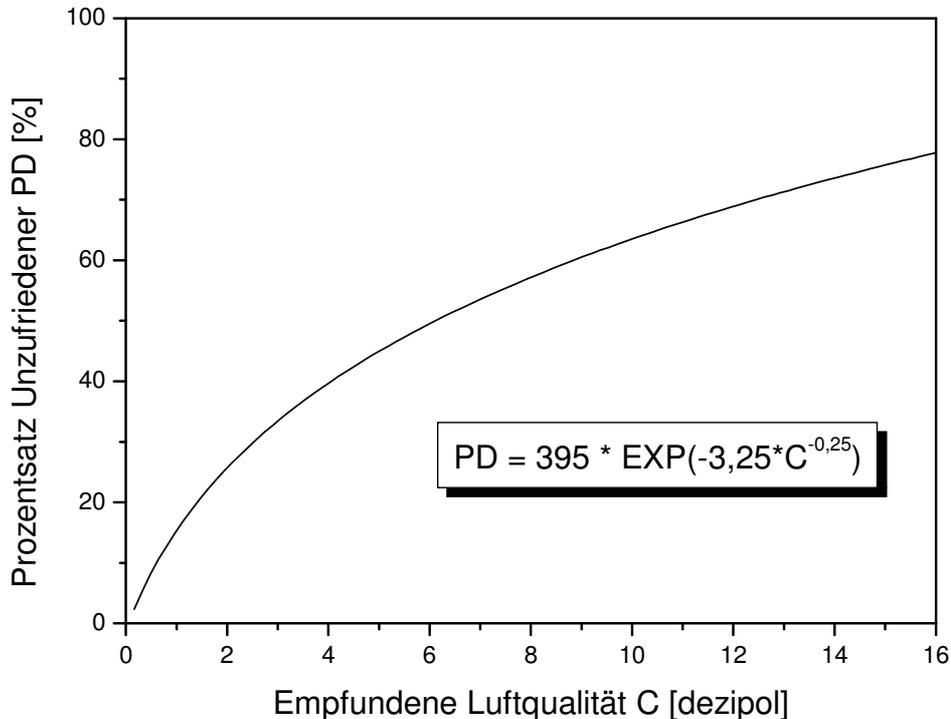


Abb. 22: Prozentsatz Unzufriedener als Funktion der empfundenen Luftqualität C

Anhand dieser Funktion ist es nun möglich, die Empfundene Luftqualität mit einer Gruppe von Probanden zu bestimmen. Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten, sind jedoch große Probandengruppen notwendig.

5.1.1 Geruchsuntersuchungen mit untrainierten Probanden

Die Probanden werden gefragt, ob sie mit der Raumluft zufrieden sind oder nicht. Je kleiner die Gruppen sind, desto stärker fallen die Bewertungen der einzelnen Personen ins Gewicht und desto fehlerbehafteter ist der ermittelte Prozentsatz Unzufriedener. Bei einer Gruppe von 10 Probanden bedeutet das eine Bewertungsgenauigkeit von 10% des PD. Die Bewertung eines Probanden bewirkt eine Änderung des Prozentsatzes Unzufriedener um 10%. Bei 50 Personen sind dies nur noch 2 %.

Das Verfahren ist mit untrainierten Probanden sehr aufwendig, da große Gruppen benötigt werden. Außerdem ist das Verfahren kostenintensiv, da die Probanden für die Bewertungen bezahlt werden müssen. Aus diesen Gründen wurde ein

Verfahren entwickelt, die Probanden so zu trainieren, dass eine Bewertung der Empfundene Luftqualität direkt in der Einheit dezipol erfolgen kann.

5.1.2 Geruchsuntersuchungen mit trainierten Probanden

Die Probanden lernen in einer mehrtägigen Schulung die empfundene Luftqualität von unbekannt Proben auf einen Vergleichsmaßstab einzuordnen. Die Luftqualität wird von den Probanden direkt in der von Fanger eingeführten Einheit dezipol angegeben. Als Vergleichsquelle dient Azeton. Den Probanden werden Meilensteine (Dezipolmeter) mit unterschiedlichen Azetonkonzentrationen dargeboten. Das Verfahren zur Schulung der Probanden und der Verwendung von Azetonproben als Vergleichsmaßstab zur Bestimmung der Luftqualität wurde 1989 von Bluysen (Bluysen, 1990)²⁵ an der Technischen Universität von Dänemark entwickelt. Sie ermittelte einen linearen Zusammenhang zwischen der Empfundene Luftqualität und der Azetonkonzentration:

$$C = 0,84 + 0,22 \cdot [c]_{\text{Azeton}} \quad (\text{Gl. 8})$$

mit C : Empfundene Luftqualität [dezipol]
 $[c]_{\text{Azeton}}$: Azetonkonzentration der Probenluft [ppm].

Der Zusammenhang ist in Abb. 24 grafisch dargestellt. Für das Training und die Untersuchungen im Labor werden vier Meilensteine mit unterschiedlichen Azetonkonzentrationen bereitgestellt. Diese entsprechen 2, 6, 10 und 17 dezipol. Während der Geruchsuntersuchung wird die zu untersuchende Probe durch einen Vergleich mit den Meilensteinen bewertet, siehe Abb. 23. Die Proben und die Vergleichsproben befinden sich in einem Edelstahlkasten, so dass die Proben für die Probanden nicht einzusehen sind. Die Azetonkonzentrationen werden in den Dezipolmetern erzeugt.

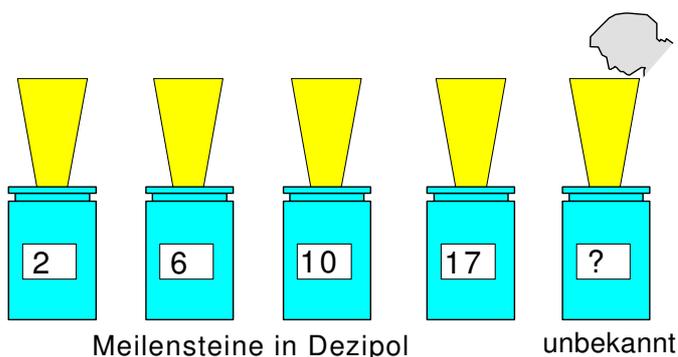


Abb. 23: Schematische Darstellung der Bewertung einer unbekannt Probe

²⁵ Bluysen, P.M.: Air Quality evaluated by a Trained Panel, PhD Thesis, University of Denmark, 1990

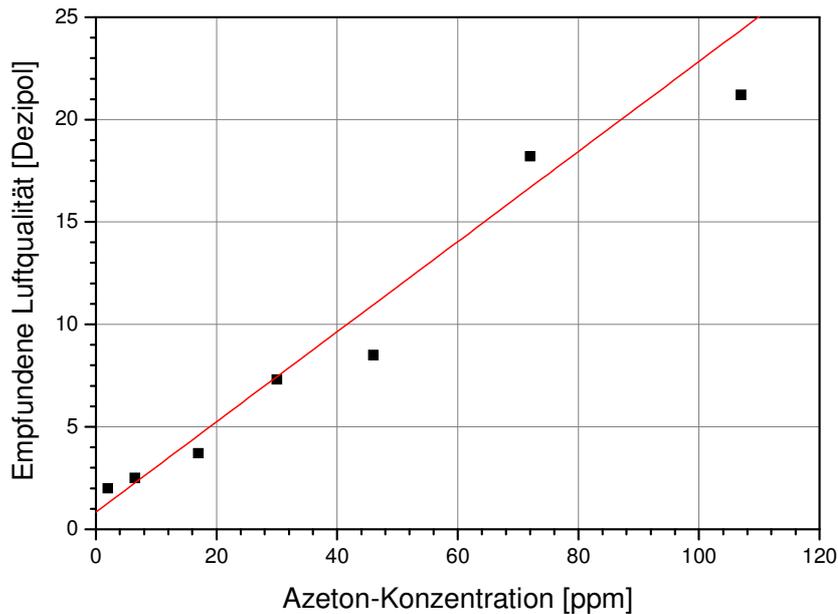


Abb. 24: Zusammenhang zwischen der Azetonkonzentration der Luft und der empfundenen Luftqualität in dezipol nach Bluysen (Bluysen,1990)

5.1.3 Training von Probanden

Das Training besteht aus vier Versuchstagen. Eine Übersicht des Trainingsprogramms ist in Tab. 3 dargestellt.

Trainingstag	Thema	Probeninhalt
1. Tag	Einführung Training Vorauswahl	8 Azetonproben
2. Tag	Training	6 Azetonproben 2 Materialproben
3. Tag	Training	4 Azetonproben 4 Materialproben
4. Tag	Abschlusstest	8 Azetonproben

Tab. 3: Trainingsprogramm zum Aufbau einer trainierten Versuchsgruppe

Am ersten Trainingstag werden den Versuchspersonen der Ablauf der Bestimmung und der Aufbau und die Funktion der Meilensteine erläutert. Danach müssen von jedem Probanden acht verschiedene Azetonkonzentrationen bestimmt werden. Die tatsächliche Luftqualität jeder einzelnen Probe wird der Versuchsperson sofort nach der Bestimmung mitgeteilt. Weicht die Bestimmung einer Versuchsperson stark vom exakten Wert ab, so erhält der Proband die Möglichkeit, die Probe unter Kenntnis des exakten Werts noch einmal zu bestimmen. Dadurch soll den Probanden die Möglichkeit gegeben werden, bei der nächsten

Bestimmung einer Probe ihren internen Maßstab an die exakten Werte anzupassen.

Nach dem ersten Trainingstag werden Probanden, die einen sehr unempfindlichen Geruchssinn haben oder eine sehr hohe Fehlerquote aufweisen, aus dem Trainingsprogramm genommen.

Am zweiten und dritten Trainingstag werden in zufälliger Reihenfolge Azetonkonzentrationen und andere unbekannte Gerüche bestimmt. Der Vergleich von Azeton mit verschiedenen unbekanntem Gerüchen ist für die Probanden zu Beginn des Trainings ungewohnt. Nach einigen Versuchen stellen sich die Probanden darauf ein, die Geruchsintensitäten der Meilensteine mit denen der unbekanntem Gerüche zu vergleichen.

Für die unbekanntem Gerüche sind keine Werte für die tatsächliche Luftqualität bekannt. Deshalb wird nach der Bestimmung durch die Betreuer ein Mittelwert für die Probandengruppe berechnet. Dieser Wert wird den Probanden mitgeteilt, damit jeder Proband sein Ergebnis selbst beurteilen und einordnen kann. Es wird jedoch bei diesen Untersuchungen kein Einfluss auf die Bestimmung einzelner Probanden genommen, da individuelle Unterschiede zwischen einzelnen Probanden bei verschiedenen Gerüchen selbstverständlich sind.

Bei der Bestimmung unbekanntem Gerüche werden die Probanden besonders darauf hingewiesen, dass die Betreuer bei diesen Versuchen keine Kontrollmöglichkeit haben. Dies ist notwendig, da bei den Probanden sonst das Gefühl einer Prüfungssituation entsteht. Bei den Untersuchungen interessiert jedoch jede individuelle Bestimmung und nicht ein zwischen den einzelnen Teilnehmern abgestimmtes Ergebnis.

Am vierten und letzten Tag findet der eigentliche Abschlusstest statt. Der Test besteht aus der Bestimmung von acht unbekanntem Azetonkonzentrationen. Als Vergleichsmaßstab stehen den Probanden die Meilensteine zur Verfügung. Während des Versuchs werden die tatsächlichen dezipol-Werte der acht Proben nicht bekannt gegeben, so dass eine vergleichende Bestimmung der unbekanntem Konzentrationen nicht möglich ist.

Nach dem Training und der Auswahl kann vor jeder Untersuchung ein kurzes Kontrolltraining der Versuchspersonen durchgeführt werden. Es genügt dieses Training in Intervallen von 4 - 6 Wochen zu wiederholen, wenn in dieser Zeit regelmäßig Versuche durchgeführt werden. Bei dem Kontrolltraining müssen von jedem Teilnehmer vier unbekanntem Azetonkonzentrationen bestimmt werden. Die Ergebnisse dieses Tests werden den Teilnehmern mitgeteilt, damit sie selbst beurteilen können, ob ihre Bestimmungen zu hoch oder zu niedrig sind.

Um am Ende des Trainings die am besten geeigneten Probanden zu bestimmen, können zur Auswertung der Testergebnisse verschiedene Auswertungsmethoden angewendet werden.

Methode 1

Bei der Bestimmung von Azetonkonzentrationen werden die Messwerte der Versuchspersonen in ein Diagramm eingetragen, siehe Abb. 25. Auf der x-Achse befindet sich der tatsächliche Wert der betreffenden Azetonprobe in dezipol, der sich aus Gl. 8 ergibt. Auf der y-Achse wird der von der Versuchsperson angegebene Messwert aufgetragen. Abb. 25 zeigt die Toleranzbereiche, die für ein erfolgreiches Bestehen des Abschlusstests erreicht werden müssen. Bei acht unbekanntem Azetonkonzentrationen dürfen maximal zwei Ergebnisse im Zwischenbereich und maximal ein Ergebnis im Außenbereich liegen. Mindestens fünf Messwerte müssen sich im Kernbereich befinden.

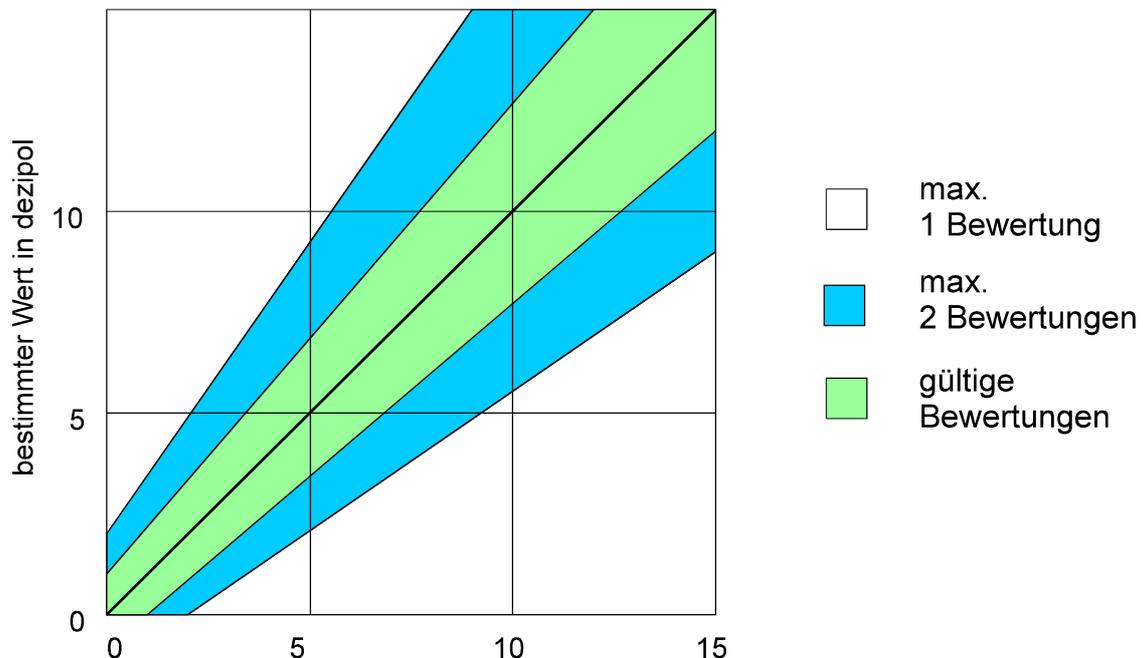


Abb. 25: Toleranzbereiche für die Bestimmung von acht unbekanntem Proben

Diese Auswertungsmethode gibt einen schnellen Überblick über die Leistung der einzelnen Versuchspersonen. Damit eignet sich dieses Verfahren sehr gut für die Vorauswahl am ersten Trainingstag. Um die am besten geeigneten Versuchspersonen zu bestimmen, sind genauere Verfahren notwendig.

Methode 2

Als Auswahlkriterium wird der Leistungsfaktor PF (Performance Factor) und die Standardabweichung verwendet. Der Leistungsfaktor ergibt sich aus:

$$PF = \frac{q_{\text{empf}} - q_{\text{tats}}}{q_{\text{tats}}} \quad (\text{Gl. 9})$$

mit PF: Leistungsfaktor bei der Bestimmung einer Azetonprobe
 q_{empf} : Empfundene Luftqualität in dezipol (entspricht dem Messwert)
 q_{tats} : tatsächliche Luftqualität in dezipol.

Der Leistungsfaktor wird für jede Bestimmung einer Versuchsperson berechnet. Um die Versuchspersonen untereinander vergleichen zu können, wird für jede Versuchsperson der Mittelwert der Leistungsfaktoren gebildet:

$$\overline{\text{PF}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{PF}_i \quad (\text{Gl. 10})$$

mit $\overline{\text{PF}}$: mittlerer Leistungsfaktor für n Azetonproben
 PF_i : Leistungsfaktor für die Bestimmung einer Azetonprobe
n: Anzahl der Bestimmungen.

Da sich bei der Mittelwertbildung negative und positive Leistungsfaktoren ausgleichen können, muss als weiteres Kriterium die Standardabweichung für die einzelnen Versuchspersonen hinzugezogen werden. Bluyssen gibt als Richtwerte für den Leistungsfaktor einen Bereich von -0,11 bis 0,11 und für die Standardabweichung einen Grenzwert von 0,4 an.

Um die Aussagekraft des mittleren Leistungsfaktors zu erhöhen, wird für die einzelnen Leistungsfaktoren der absolute Betrag gebildet:

$$\overline{\text{PF}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\text{PF}_i| \quad (\text{Gl. 11})$$

mit $\overline{\text{PF}}$: mittlerer Leistungsfaktor für n Azetonproben
 $|\text{PF}_i|$: absoluter Betrag des Leistungsfaktors für eine Azetonprobe
n: Anzahl der Bestimmungen.

Dadurch gleichen sich positive und negative Werte bei der Bildung des Mittelwerts nicht mehr aus und der errechnete Mittelwert entspricht der durchschnittlichen Ergebnisabweichung der betreffenden Versuchsperson.

Für den Leistungsfaktor (PF) und die Standardabweichung werden Ranglisten aufgestellt. Probanden mit einem geringen Leistungsfaktor und einer geringen Standardabweichung sind am besten geeignet. Die ausgewählten Versuchspersonen müssen einen PF geringer als 0,3 und eine Standardabweichung niedriger als 0,35 haben.

Methode 3

Nach Fanger wird für jeden Probanden und jede Probe ein individueller Leistungsfaktor (IPF - Individual Performance Factor) ermittelt. Dieser ergibt sich aus:

$$\text{IPF} = \frac{(q_{\text{empf}} - q_{\text{tats}})}{A \cdot q_{\text{tats}} + B} \quad (\text{Gl. 12})$$

mit IPF: Leistungsfaktor bei der Bestimmung einer Azetonprobe

q_{empf} : Empfundene Luftqualität in dezipol (Proband)

q_{tats} : tatsächliche Luftqualität in dezipol

A, B: Korrekturfaktoren.

Die Korrekturfaktoren sind von der zu bestimmenden Luftqualität abhängig und werden wie folgt definiert:

Für empfundene Luftqualität < 5 dezipol:

$$A = -3/28,$$

$$B = +59/28.$$

Für empfundene Luftqualität \geq 5 dezipol:

$$A = +4/28,$$

$$B = +24/28.$$

Durch diese Korrekturfaktoren wird im Bereich von 0 bis 5 dezipol eine größere Toleranz zugelassen als bei den vorherigen Auswertungsmethoden. Damit beachtet dieses Verfahren den Umstand, dass es den Versuchspersonen im Bereich von 0 - 5 dezipol schwerer fällt, die unterschiedlichen Azetonkonzentrationen zu unterscheiden.

5.1.4 Bestimmung unbekannter Gerüche

Im Rahmen eines europäischen Audit-Projektes zur Optimierung der Luftqualität in Innenräumen und des Energieaufwandes führten Clausen et. al (Clausen, 1993)²⁶ Bewertungen der empfundenen Luftqualität in Büroräumen durch. Sie untersuchten die Standardabweichung der Bewertungen der trainierten Probandengruppe und bestimmten aus den Ergebnissen die zulässigen Standardabweichungen in Abhängigkeit der mittleren empfundenen Luftqualität der Probandengruppe. Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist in Abb. 26 dargestellt.

Dieses Kriterium wird beim Training der Probanden herangezogen. Bei der Bestimmung eines unbekanntes Geruches werden für die Versuchsgruppe ein Mittelwert der empfundenen Luftqualität und die Standardabweichung bestimmt.

²⁶ Clausen, G.; Pejtersen, J.; Bluysen, P.M.: Final Research Manual of „European Audit Project to Optimize Indoor Air Quality and Energy Consumption in Office Buildings“, Technical University of Denmark, TNO-Building and Construction Research, 1993

Damit eine gewisse Genauigkeit der Messung gewährleistet ist, muss die Standardabweichung der gesamten Gruppe unter der in Abb. 26 angegebenen liegen.

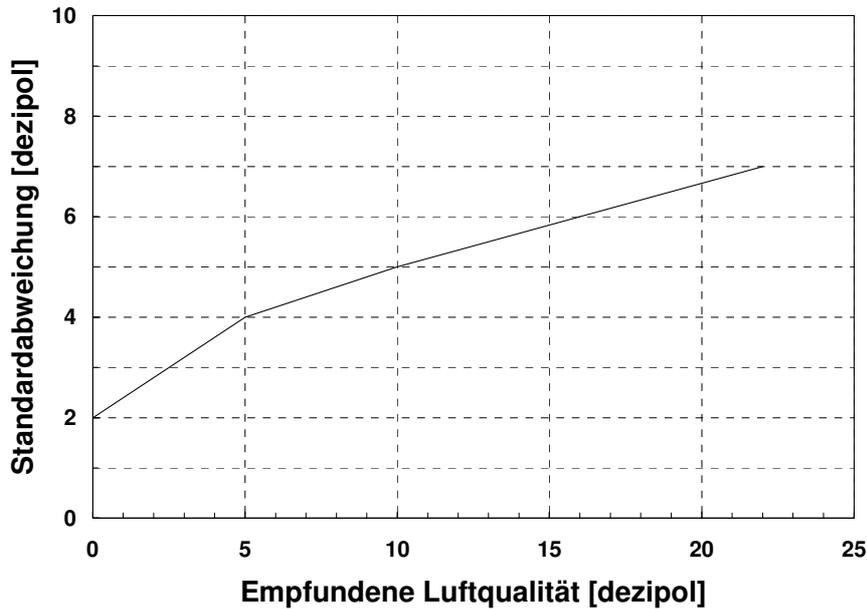


Abb. 26: Zulässige Standardabweichung bei der Bestimmung unbekannter Proben

5.1.5 Auswertung der Trainingsergebnisse

Anhand eines Beispiels soll die Auswertung eines Trainings nach den beschriebenen Verfahren veranschaulicht werden. Am ersten Trainingstag nehmen 21 Versuchspersonen teil. In Abb. 27 ist für eine Versuchsperson die Bestimmung der unbekanntes Azetonproben des ersten Trainingstages dargestellt. Da sich 5 Messergebnisse im Kernbereich und nur ein Messergebnis im Zwischen- bzw. Außenbereich befindet, hat die betreffende Versuchsperson den Test bestanden. Alle 21 Versuchspersonen haben diesen Vortest bestanden und konnten deshalb auch an den weiteren Trainingstagen teilnehmen.

In Tab. 4 und Tab. 5 sind die Ergebnisse eines Abschlusstests ausgewertet. Für jede Versuchsperson werden der Mittelwert der Leistungsfaktoren PF und IPF und die jeweils dazugehörige Standardabweichung gebildet. Mit diesen Größen konnte für die Versuchspersonen eine Rangfolge festgelegt werden. Die Platzierung einer Versuchsperson ist umso besser, je kleiner die Werte des Leistungsfaktors (PF bzw. IPF) und der Standardabweichung sind.

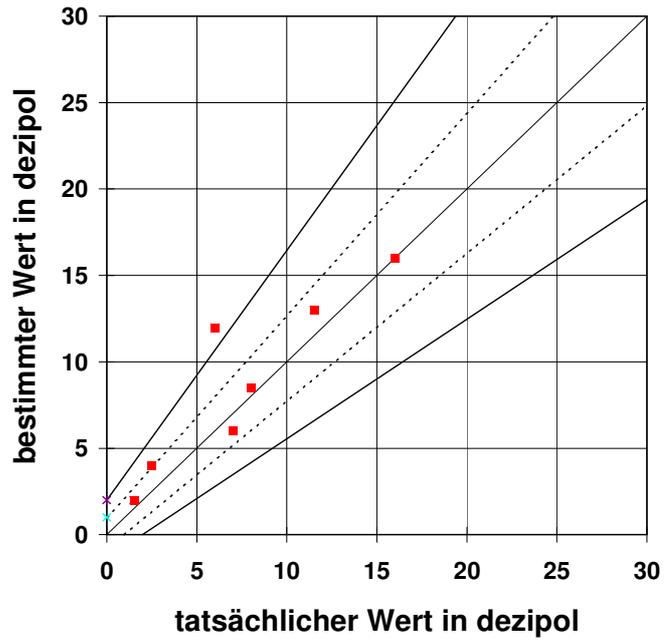


Abb. 27: Beispiel für die Versuchsergebnisse einer Versuchsperson am ersten Trainingstag

Rangfolge	Person	Leistungsfaktor PF	Standard- abweichung
1	C	0.06	0.08
2	E	0.11	0.06
3	A	0.10	0.08
4	F	0.13	0.06
5	P	0.16	0.12
6	D	0.18	0.16
7	J	0.26	0.19
8	K	0.24	0.20
9	O	0.24	0.23
10	H	0.27	0.25
11	I	0.31	0.27
12	S	0.35	0.30
13	R	0.35	0.31
14	Q	0.31	0.37
15	U	0.34	0.41
16	T	0.35	0.48
17	M	0.42	0.44
18	N	0.42	0.49
19	G	0.48	0.61
20	B	0.47	0.69
21	L	0.66	0.58

Tab. 4: Auswertung des Abschlusstests nach Methode 2

Rangfolge	Person	Leistungsfaktor IPF	Standard- abweichung
1	E	0.32	0.19
2	C	0.21	0.31
3	F	0.45	0.28
4	A	0.36	0.38
5	K	0.58	0.25
6	P	0.49	0.44
7	O	0.70	0.52
8	J	0.74	0.48
9	D	0.68	0.79
10	R	0.90	0.73
11	H	0.93	0.70
12	I	0.94	0.69
13	Q	0.89	0.83
14	B	0.98	0.84
15	U	0.94	0.93
16	S	1.12	0.78
17	T	0.85	1.11
18	G	1.12	0.85
19	M	1.18	1.00
20	N	1.14	1.10
21	L	1.62	1.00

Tab. 5: Auswertung des Abschlusstests nach Methode 3

Die unterschiedliche Rangfolge in den Tabellen ergibt sich aus der in Methode 3 erläuterten unterschiedlichen Wertung von Messfehlern im Bereich von 0 - 5 dezipol. In Tab. 5 besser platzierte Versuchspersonen haben im Bereich von 0 - 5 dezipol eine etwas größere Abweichung, die durch die Auswertungsmethode 3 aber etwas toleranter bewertet wird.

In Abb. 28 ist das unterschiedliche Verhalten der beiden Auswertungsmethoden dargestellt. Auf der y-Achse ist der mittlere Leistungsfaktor (PF bzw. IPF) der gesamten Versuchsgruppe aufgetragen. Er entspricht dem Mittelwert aus den Einzelleistungsfaktoren der 21 Versuchspersonen bei einer bestimmten Azetonkonzentration. Auf der x-Achse sind die empfundenen Luftqualitäten in dezipol aufgetragen, die von der Versuchsgruppe bestimmt werden mussten.

Abb. 28 zeigt, dass der IPF-Leistungsfaktor konstant und unabhängig von der Höhe der zu bewertenden empfundenen Luftqualität ist. Im Gegensatz dazu ist der PF-Leistungsfaktor im Bereich 0 - 5 dezipol deutlich höher als im Bereich über 5 dezipol. Die endgültige Auswahl der Versuchspersonen wurde nach der Rangfolge aus Tab. 5 durchgeführt.

Dass die Auswahl der Versuchspersonen die Genauigkeit einer Messung verbessert, ist in Abb. 29 dargestellt. In dem Balkendiagramm sind die Leistungsfaktoren IPF der 14 ausgewählten Versuchspersonen mit denen der nicht ausgewählten Versuchspersonen verglichen. Die am Trainingsende ausgewählten Versuchspersonen wiesen über das gesamte Training hinweg bessere Ergebnisse auf.

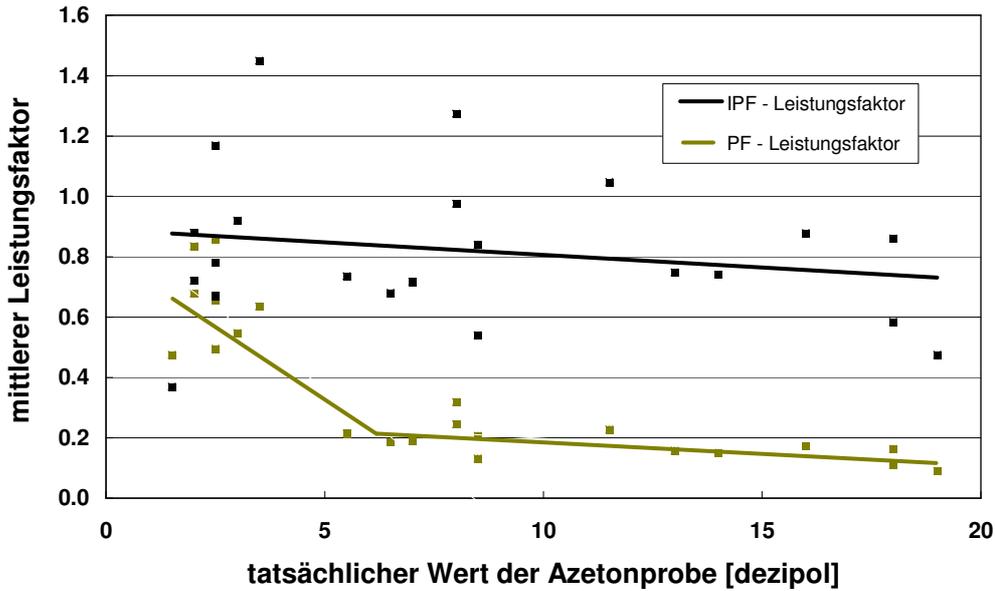


Abb. 28: Abhängigkeit der Leistungsfaktoren IPF und PF von der zu bestimmenden Azetonkonzentration

Bei der Bestimmung von unbekanntem Gerüchen erreichte die Versuchsgruppe eine Standardabweichung von 1,1 dezipol bei einem Messwert von 4 dezipol und 2,8 dezipol bei einem Messwert von 12 dezipol. Maximal zulässig wären 3,6 dezipol bei einem Messwert von 4 dezipol und 5,3 dezipol bei einem Messwert von 12 dezipol.

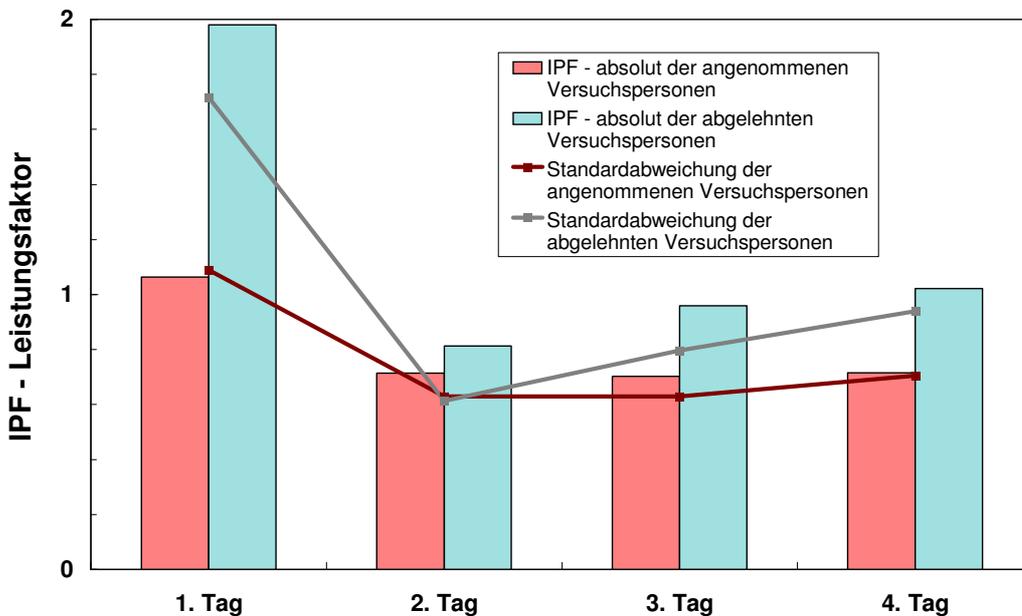


Abb. 29: Leistungsentwicklung der Versuchsgruppe

5.2 Befragungen von Probanden

Im folgenden Abschnitt sollen einige Fragestellungen mit den zugehörigen Skalen aufgeführt und erläutert werden.

Frage 1: Akzeptanz/PD (Zwei-Punkt-Skala)

Stellen Sie sich vor, Sie müssten während Ihrer täglichen Arbeit diesen Raum häufig betreten!

Würden Sie den Geruch in diesem Raum als akzeptabel bewerten?

akzeptabel

nicht akzeptabel

Abb. 30: Fragestellung zur Bestimmung des Prozentsatzes Unzufriedener

$$PD = \frac{\text{Anzahl der Antworten 'nicht akzeptabel'}}{\text{Anzahl aller Antworten}} \quad (\text{Gl. 13})$$

Für die Auswertung werden die Anzahl der Antworten 'nicht akzeptabel' aus Frage 1 durch die Anzahl der abgegebenen Bestimmungen dividiert. Diesen Wert bezeichnet man als Prozentsatz Unzufriedener (engl.: percentage dissatisfied).

Frage 2: Akzeptanz (20-Punkt-Skala)

Bitte beurteilen Sie die Raumluft zusätzlich auf der Skala von -10 bis +10!

Kreuzen Sie einen Skalenpunkt an, der Ihrer Einschätzung entspricht!

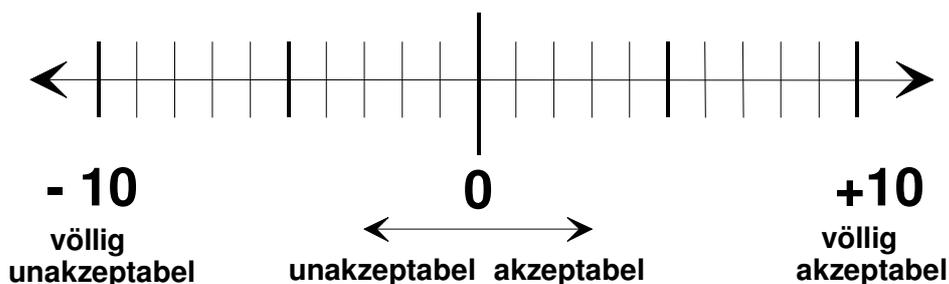


Abb. 31: Fragestellung zur Bestimmung des Akzeptanzwertes

$$A_{MW} = \text{Mittelwert (alle Antworten)} \quad (\text{Gl. 14})$$

Aus Frage 2 wird zuerst ein Mittelwert (A_{MW}) aus allen Antworten gebildet. Dieser Mittelwert wird als Akzeptanz bezeichnet (engl.: acceptability).

Frage 3: Akzeptanz (kontinuierliche Skala)

An der Universität von Dänemark in Kopenhagen wird für die Akzeptanz eine kontinuierliche Skala verwendet. Diese wird in Werte von +1 (clearly acceptable) bis -1 (clearly not acceptable) umgerechnet. Wie bei der 20-Punkt-Skala (Frage 2) wird auch hier aus allen Antworten ein Mittelwert gebildet.

How do you assess the air quality ?

Pay attention to the dichotomy between acceptable and not acceptable

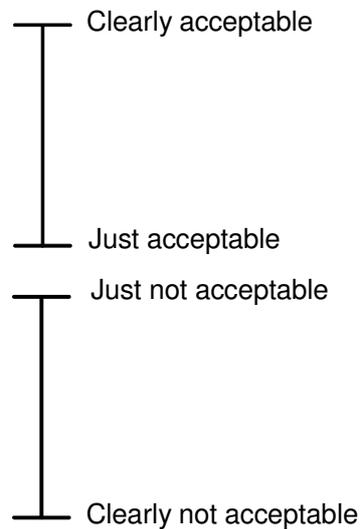


Abb. 32: Fragestellung zur Bestimmung der Akzeptanz mit einer kontinuierlichen Skala, verwendet an der Technischen Universität von Dänemark

Frage 4: Intensität (6-Punkt-Skala)

An der Universität von Dänemark wird neben der Akzeptanz auch eine zweite Frage nach der Intensität des Geruches gestellt. Der Geruch soll hier über eine 6-Punkt-Skala von geruchlos (no odour) bis sehr stark (overpowering) klassifiziert werden.

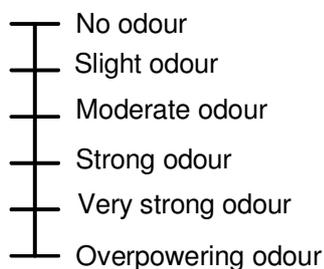
Assess odour intensity

Abb. 33: Skala zur Bestimmung der Geruchsintensität

5.3 Durchführung einer direkten Raumbewertungen

Die Probandengruppe wird von einem Raum zum nächsten gebracht. Die Probanden betreten einzeln nacheinander die Räume und bewerten die empfundene

Luftqualität direkt nach dem Betreten der Räume. Die Bewertung erfolgt nach dem ersten Eindruck, noch bevor eine Adaptation des Geruches erfolgen kann und die Geruchsempfindung so herabgesetzt wird. Die trainierte Probandengruppe bewertet die Luftqualität direkt in der Einheit dezipol. Zusätzlich werden die Probanden gebeten eine Akzeptanzbewertung (ja/nein) anzugeben, d.h. ob sie sich vorstellen können, dass sie es akzeptabel finden, wenn sie acht Stunden bei dieser Luftqualität arbeiten müssen.

Neben dieser Bewertung werden die Probanden nach der Art des Geruches befragt, und ob sie diesen identifizieren und mit etwas in Verbindung bringen können. So können Besonderheiten an manchen Messtagen, die aus der Raumnutzung resultieren, wie zum Beispiel Parfümgeruch, Kaffeegeruch oder der Geruch nach Reinigungsmittel, erkannt und bei der Auswertung der Bewertungen berücksichtigt werden.

Während der Bewertungen wurde vom Prüfpersonal festgehalten, ob die Fenster und Türen geöffnet und die Räume gelüftet wurden und wie viele Personen sich in dem Raum aufhielten. So sollen Unterschiede in den Raumlasten und der Lüftung der Räume festgehalten werden.

Abb. 34 zeigt einen Fragebogen, den die Probanden während eines Bewertungsdurchgangs ausfüllen. In der ersten Spalte steht die Bezeichnung des untersuchten Raumes. In die zweite Spalte tragen die Probanden ihre Bewertung der empfundenen Luftqualität in dezipol ein. Spalte 3 gibt an, ob sie die Luftqualität als akzeptabel ansehen. Ist der Probanden in der Lage den Geruch zu identifizieren, so kann er in der letzten Spalte den Geruchseindruck vermerken. In dem hier dargestellten Bogen sind die ersten zwei Raumbewertungen eines Probanden beispielhaft eingetragen.

	Empfundene Luftqualität	akzeptabel (ja/nein)	Wonach riecht es hier?
Außenluft	1 – 2	ja	frisch
Vor HL 10 Gang	2	ja	
HL 2	7	ja	Kaffee
HL 3	9	ja	Linoleum
HL 4			
HL 14, Werkstatt			

Abb. 34: Fragebogen zur Bewertung der Empfundene Luftqualität in Räumen

5.4 Zweistufiges Bewertungsverfahren

In der Literatur existieren verschiedene Messmethoden die Geruchsintensität, die empfundene Luftqualität, die Akzeptanz oder die Hedonik von Gerüchen zu bestimmen. Eine Umrechnung der verschiedenen Messgrößen ist nur teilweise möglich, so dass Ergebnisse verschiedener Studien nur schwer miteinander verglichen werden können. Diese Problematik hat die Anwendung der Messgröße „empfundene Luftqualität“ in der Praxis erheblich erschwert. Am Hermann-Rietschel-Institut wird zurzeit an der Entwicklung einer neuen Systematik für die Bestimmung der Luftqualität gearbeitet. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Addition von Gerüchen.

Das „olf“ als universelle Quellenstärke

Mit der Definition der Quellstärke „olf“ werden alle Geruchsstoffe gleichgestellt. Diese Annahme konnte in den jüngsten Untersuchungen des Hermann-Rietschel-Instituts nicht bestätigt werden.

Im Rahmen von Emissionsuntersuchungen von Baustoffen wurde neben der direkten Bewertung durch trainierte Probanden auch ein Verfahren der dynamischen Olfaktometrie nach DIN EN 13725 angewendet. Bei diesem Verfahren wird die Geruchsschwelle einer Probe als Bewertungsmaßstab der Geruchsstärke angenommen. Die Geruchsschwelle ist erreicht, wenn die Konzentration von Geruchsträgern bei 50% der Probanden zu einem Geruchseindruck führt. Daraus leitet sich die Geruchseinheit GE ab: 1 GE ist die Menge Geruchsträger die in 1m³ Neutralluft verteilt eine Geruchsempfindung auslöst.

Neben Azeton (300 mg/m³) wurden die Emissionen aus einem Klebstoff und einer Spanplatte zunächst am Olfaktometer und anschließend mit einer trainierten Probandengruppe in dezipol bewertet.

Probe	Empfundene Luftqualität in dezipol	Geruchsschwelle in GE
Azeton	30	15
Klebstoff	29	70
Holz	17	32

Tab. 6: Bewertung der Proben in dezipol und Bestimmung der Geruchsschwelle in GE

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass Azeton und Klebstoff von den trainierten Probanden mit 29 bzw. 30 dezipol nahezu gleich bewertet werden, bei der Geruchsschwellenbestimmung aber stark voneinander abweichen. Wird bei einer 15-fachen Verdünnung die Geruchsschwelle von Azeton erreicht, müssen die

Emissionen des Klebstoffs 70-fach verdünnt werden. In Abb. 35 ist dieser Zusammenhang graphisch dargestellt.

Die Proben zeigen ein sehr unterschiedliches Verdünnungsverhalten gegenüber den Ausgangskonzentrationen der geruchsaktiven Substanzen. Mit der Definition einer stoffunabhängigen Quellstärke (olf) kann dieses Verhalten nicht abgebildet werden.

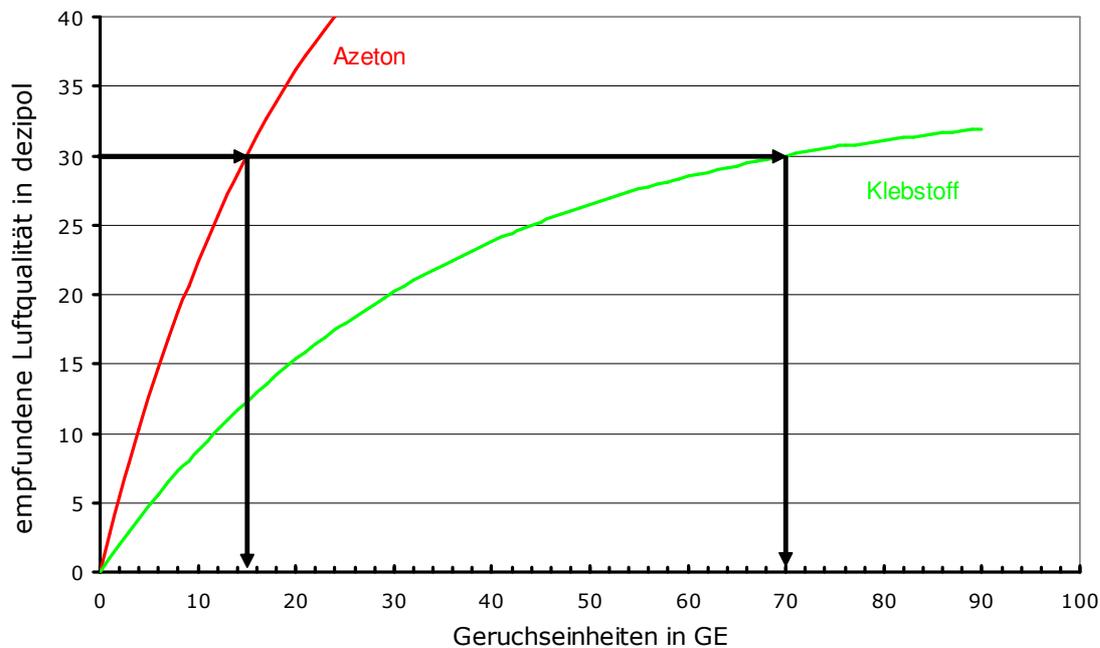


Abb. 35: Schematischer Zusammenhang der empfundenen Luftqualität in dezipol und Geruchseinheiten in GE

Untrainierte und trainierte Probandengruppen

Bisherige Umrechnungsfunktionen für das Überführen der Bewertungen von untrainierten und trainierten Probandengruppen setzen voraus, dass die Bewertungen unabhängig von äußeren Einflüssen sind.

Untrainierte Probandengruppen zeigen jedoch eine andere Reaktion auf Änderungen des thermischen Zustands der Luft als trainierte. Nach Untersuchungen von Fang²⁷ und Böttcher²⁸ nimmt bei einer untrainierten Probandengruppe die Akzeptanz von Luft bei konstanter Verunreinigungslast mit steigender spezifischer Enthalpie ab, siehe Abb. 36. Ob die Änderung der spezifischen Enthalpie

²⁷ L. Fang; „Impact of Temperature and Humidity on Perceived Indoor Air Quality“; Ph. D. Thesis; Technical University of Denmark; 1997

²⁸ O. Böttcher: „Experimentelle Untersuchung zur Berechnung der empfundenen Luftqualität“; Dissertation; Technische Universität Berlin, 2003

durch eine Variation der Temperatur oder der Feuchte eingestellt wurde, hatte keinen Einfluss auf dieses Versuchsergebnis.

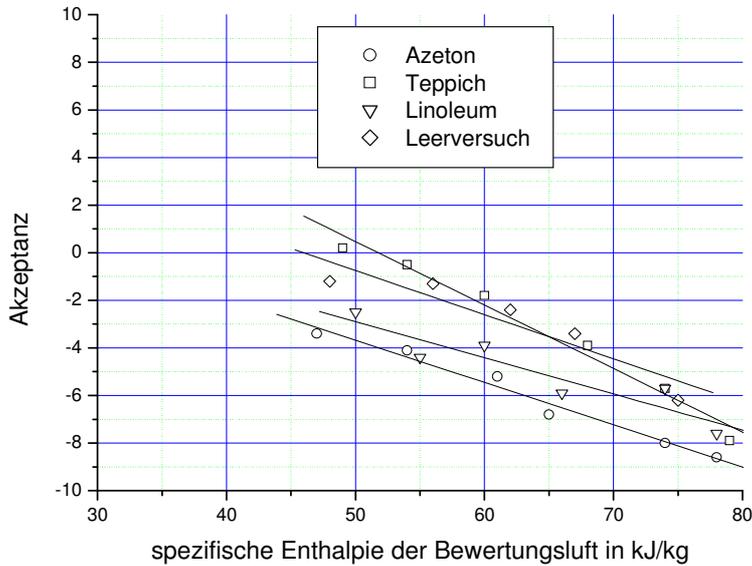


Abb. 36: Zusammenhang zwischen der spezifischen Enthalpie und der empfundenen Luftqualität bei einer untrainierten Probandengruppe

Bei einer trainierten Probandengruppe hingegen zeigt sich kein einheitliches Verhalten bei der Bewertung von Luftproben mit unterschiedlicher spezifischer Enthalpie. Die Versuchsergebnisse von Böttcher für den Geruchsstoff Azeton sind in Abb. 37 zusammengefasst.

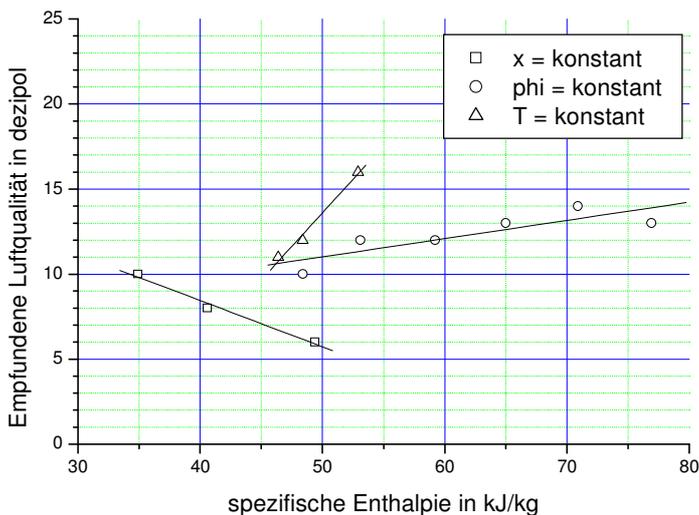


Abb. 37: Einfluss einer Änderung der spezifischen Enthalpie auf die Bewertung der empfundenen Luftqualität durch eine trainierte Probandengruppe

Die Temperatur T und die absolute Feuchte x haben einen gegenläufigen Effekt auf die Bewertung der empfundenen Luftqualität einer trainierten Probandengruppe. Wird die relative Feuchte während der Versuche nicht verändert, ergibt sich keine oder nur eine sehr geringe Korrelation zwischen der spezifischen Enthalpie und der empfundenen Intensität eines Geruches. Dieses Untersuchungsergebnis macht deutlich, dass untrainierte und trainierte Probandengruppen nicht die gleiche Messgröße erfassen. Diese Feststellung erklärt die bisherigen Schwierigkeiten bei der Umrechnung der mit untrainierten und trainierten Probandengruppen gewonnenen Messergebnisse.

5.4.1 Aufbau des zweistufigen Bewertungsverfahrens

Basierend auf den genannten Ergebnissen ist ein zweistufiges Modell für die Bestimmung der empfundenen Luftqualität abgeleitet worden. Das Modell berücksichtigt die Unterschiede von untrainierten und trainierten Probanden.

Ein beliebiges Material gibt verschiedene chemische Substanzen an die Umgebungsluft ab. In der ersten Bewertungsstufe detektiert die Nase als Sensor die vom Material emittierten geruchsaktiven Substanzen. Die unterschiedliche Empfindlichkeit der Nase auf verschiedene geruchsaktive Substanzen ergibt beim Probanden die empfundene Intensität II der in der Luft enthaltenen Geruchsstoffe. Die relative Feuchtigkeit der Luft beeinflusst den Stoffübergang an der feuchten „Sensoroberfläche“ der Nase und wirkt somit auf den Intensitätseindruck eines Geruchs. Trainierte Probanden, die mit einem Vergleichsmaßstab arbeiten, versuchen die Intensität des Geruchs einer Probe unter Verwendung der Referenzproben des Maßstabs einzuordnen. Die Akzeptanz des Geruchseindrucks steht im Hintergrund und wird nicht mit dieser Bewertung abgefragt.

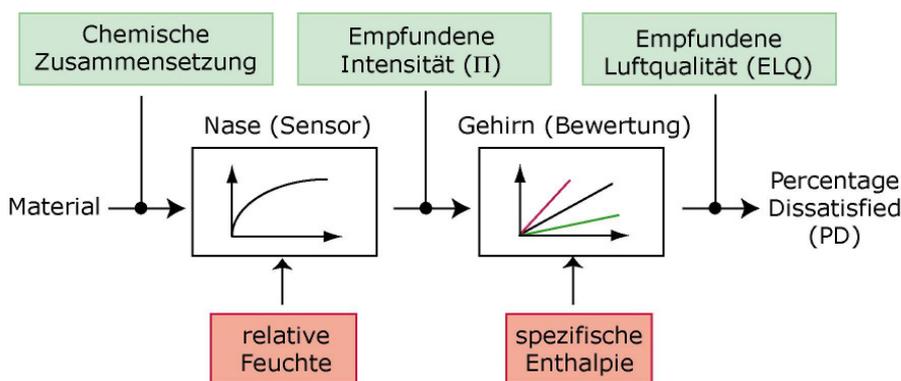


Abb. 38: Zweistufige Bewertung der Luftqualität durch einen Probanden

In der zweiten Stufe des Riechvorgangs bewertet das Gehirn die von der Nase gesendeten Signale. Neben der Intensität entscheidet nun die Hedonik des Geruchs über sein Wirken auf den Probanden. Bei der untrainierten Probandengruppe wird nach der Akzeptanz der Luft als tägliches Arbeitsumfeld gefragt. Es steht kein Maßstab für eine Bestimmung einer Geruchsintensität zur Verfügung.

Der untrainierte Proband wird nicht gezwungen, sich auf die Intensität des Geruchseindrucks zu konzentrieren. Somit wird mit der Fragestellung nach der Akzeptanz direkt der Prozentsatz Unzufriedener ermittelt, über den sich die empfundene Luftqualität definiert. Die Erhöhung der spezifischen Enthalpie wirkt sich negativ auf die empfundene Luftqualität aus. In der hedonischen Bewertung hat somit neben der relativen Feuchte auch die Temperatur einen Einfluss auf das Messergebnis, obwohl sich die Intensität des empfundenen Geruches nicht verändert.

5.4.2 Einführung der empfundenen Intensität

Die empfundene Intensität Π kann nur mit trainierten Probanden unter Einsatz eines Vergleichsmaßstabes bestimmt werden. Die Einheit von Π ist π_i . Der Vergleichsmaßstab am Hermann-Rietschel-Institut besteht aus Azetonluftgemischen. Die Abstufung ist dabei bisher linear in Bezug auf die Azetonkonzentration. Momentan wird jedoch an einer intensitätslinearen Skala gearbeitet, die unabhängig vom Basisgeruchsstoff für den Aufbau eines Vergleichsmaßstabes verwendet werden kann. Eine spätere Umrechnung der Ergebnisse ist problemlos möglich.

Die Vergleichsskala für die Intensität am Hermann-Rietschel-Institut ist durch folgende Punkte festgelegt:

- $0 \pi_i = 20 \text{ mg Azeton} / \text{m}^3_{\text{Luft}}$. Bei $20 \text{ mg Azeton} / \text{m}^3_{\text{Luft}}$ können 50% der Probanden einen Geruch wahrnehmen. Es handelt sich dabei um die Geruchsschwelle für Azeton. Diese Azetonkonzentration entspricht ungefähr 2 dezipol.
- Konzentrationen für 1 bis $n \pi_i$ folgen aus einer linearen Abstufung der Azetonkonzentrationen. Ziel der weiteren Entwicklung ist eine lineare Skala in Bezug auf die empfundene Intensität.

Bewertungen unterhalb von $\Pi = 0 \pi_i$ sind nicht sinnvoll, da nur noch sehr wenige Probanden diesen geringen Geruchseindruck wahrnehmen können.

5.4.3 Logarithmische Kennlinien für die empfundene Intensität

Analog zum Weber-Fechner-Gesetz²⁹, das sich für andere Sinneswahrnehmungen bewährt hat, wird auch bei der Intensität eines Geruchsstoffes von einem logarithmischen Verlauf in Bezug auf die Konzentration ausgegangen. Alle Geruchsstoffe besitzen demnach eine logarithmische Kennlinie in Bezug auf ihre Konzentration. Da nur in Ausnahmefällen einem Geruchseindruck einer Materialprobe

²⁹ Fechner, G. T.: „Elemente der Psychophysik“, Bd. 2, Breitkopf und Härtel Leipzig, 1860

eine bestimmte Substanz zugeordnet werden kann, ist in den meisten Fällen die Angabe der Konzentration C nicht möglich. Die Angabe einer flächenspezifischen Luftdurchflussrate q_A oder der neu eingeführten volumenstromspezifischen Flächenlast A_q wird sinnvoll.

Die flächenspezifische Luftdurchflussrate q_A ist ein übliches Maß für die Emissionsmessung in Prüfkammern (entw. DIN EN 13419-1). Sie setzt den Volumenstrom \dot{V} ins Verhältnis zur freien Oberfläche A_{eff} eines Stoffes.

$$q_A = \frac{\dot{V}}{A_{\text{eff}}} \quad (\text{Gl. 15})$$

Die Bildung des invertierten Werts führt zur volumenstromspezifischen Flächenlast A_q . Mit dieser Größe kann die auf die Lüftungsrate bezogene Oberfläche eines Baustoffes in einem Raum in einer Emissionskammer nachgestellt werden. Die Ergebnisse von Einzelstoffuntersuchungen in einer Emissionskammer sind somit übertragbar auf die Geruchsbelastung durch diesen Stoff in einem belüfteten Raum.

$$A_q = \frac{A_{\text{eff}}}{\dot{V}} \quad (\text{Gl. 16})$$

$$\Pi = a \cdot \log_{10} \left(\frac{C}{C_0} \right) = a \cdot \log_{10} \left(\frac{q_{A,0}}{q_A} \right) = a \cdot \log_{10} \left(\frac{A_q}{A_{q,0}} \right) \quad (\text{Gl. 17})$$

Für jede geruchsaktive Substanz oder analog für jeden geruchsrelevanten Baustoff mit einer freien Oberfläche im Raum müssen zur Ermittlung des logarithmischen Verlaufs der Geruchsintensität mindestens zwei Konzentrationen oder flächenspezifische Luftdurchflussraten gemessen werden. Es empfiehlt sich eine höhere Anzahl von Messpunkten mit einer anschließenden Ausgleichsrechnung, so dass Schwankungen von Einzelbewertungen ausgeglichen werden können. Der so bestimmte Parameter a ist ein Maß für den Anstieg der Intensitätsempfindung mit der Konzentration oder flächenspezifischen Luftdurchflussrate. Da bei $\Pi = 0$ die Geruchsschwelle liegt, gibt der Wert für C_0 die entsprechende Geruchsschwellenkonzentration und $A_{q,0}$ die erforderliche emittierende Materialfläche zum Erreichen der Geruchsschwelle für einen Einzelstoff oder von Stoffkombinationen an.

$$\Pi = 0 = a \cdot \log_{10} \left(\frac{C}{C_0} \right) = a \cdot \log_{10} \left(\frac{A_q}{A_{q,0}} \right) \rightarrow \frac{C}{C_0} = 1; \quad \frac{A_q}{A_{q,0}} = 1 \quad (\text{Gl. 18})$$

Unterschiedliche Baumaterialien zeigen deutliche Differenzen in Kennlinien der empfundenen Intensität. Die Verwendung einer einheitlichen Quellenstärke für die Bewertung der Luftqualität ist deshalb nicht möglich (siehe auch Kapitel 3.1).

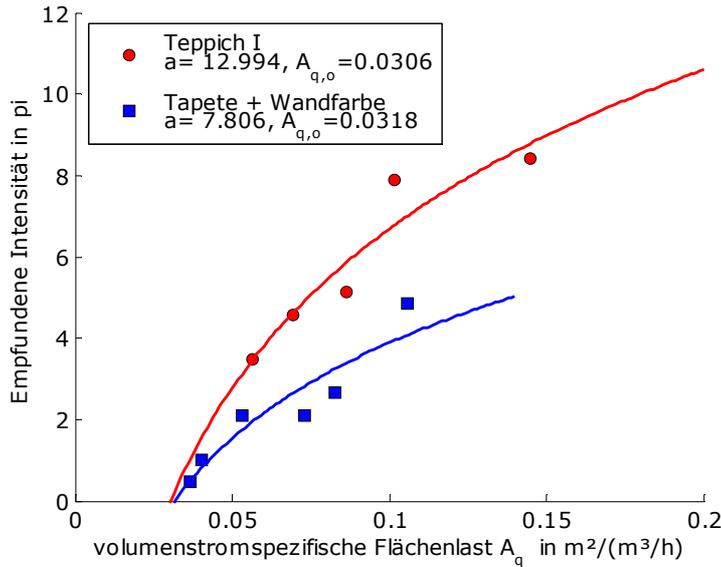


Abb. 39: Logarithmische Kennlinien der empfundenen Intensität zweier Geruchsstoffe

Die rechnerischen Werte der empfundenen Intensität Π können negativ werden, obwohl eine messtechnische Erfassung dieser Werte nicht möglich ist. Angaben zur empfundenen Intensität Π sind nur im positiven Bereich über das beschriebene Messverfahren definiert.

5.4.4 Addition von Geruchsintensitäten

Für die Vorhersage der Luftqualität in einem Raum mit bekannten Geruchsquellen, beispielsweise Baustoffen, müssen geeignete Additionsregeln für Geruchsstoffe aus unterschiedlichen Materialien ermittelt werden. Da Böttcher zeigte, dass zur Beschreibung des Zusammenhanges zwischen Empfindung und Reizstärke für den Geruchssinn analog zum Hörsinn eine logarithmische Funktion verwendet werden kann, liegt die Übertragung der bekannten Additionsregel für die Schallintensitäten auf die Addition von Geruchsintensitäten nahe. Die folgende Formel gibt Berechnung des Schallpegels L_i einer Schallquelle in der Einheit Dezibel [dB] an.

$$L_i = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (\text{Gl. 19})$$

Der Faktor vor dem Logarithmus ist konstant und somit unabhängig von der Schallquelle. In den Untersuchungen zur Wahrnehmung von Gerüchen ist dieser Faktor, im Folgenden mit a gekennzeichnet, abhängig vom untersuchten Stoff. Aufgrund der vermuteten Analogie zwischen Hör- und Geruchssinn wird bei der Berechnung des resultierenden Faktors a_{ges} für mehrere Geruchsquellen der arithmetische Mittelwert der Einzelfaktoren gebildet. In Tab. 7 ist die angesetzte

Analogie für die Addition von Reizen zwischen dem Hör- und dem Geruchssinn dargestellt.

Hörsinn	Geruchssinn
$L_1 = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right)$	$\Pi_1 = a \cdot \log_{10} \left(\frac{C}{C_0} \right)$
$L_{\text{ges}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right)$	$\Pi_{\text{ges}} = a_{\text{ges}} \cdot \log_{10} \left(\sum_{i=1}^n 10^{\Pi_i/a_i} \right)$
	$\Pi_{\text{ges}} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \cdot \log_{10} \left(\sum_{i=1}^n 10^{\Pi_i/a_i} \right)$

Tab. 7: Angenommene Analogie für die Addition von Reizen zwischen dem Hör- und dem Geruchssinn

Für den Fall, dass die spezifischen Parameter a_i der untersuchten Stoffe gleich sind, ist die Berechnung der empfundenen Luftqualität der Geruchsstoffkombination aus den Einzelstoffkennlinien vollständig analog zur Pegeladdition in der Akustik.

In Versuchen mit Zweistoff-Kombinationen konnte von Böttcher gezeigt werden, dass sich die empfundene Geruchsintensität einer Überlagerung von Geruchsstoffen näherungsweise analog zum resultierenden Schallpegel mehrerer Schallquellen berechnen lässt. In einem Versuchsaufbau, siehe Abb. 40, wurden in zwei Emissionskammern Materialproben eingebracht. Die Kammern wurden nacheinander durchströmt, so dass sich die Emissionen aus den Materialien überlagerten.

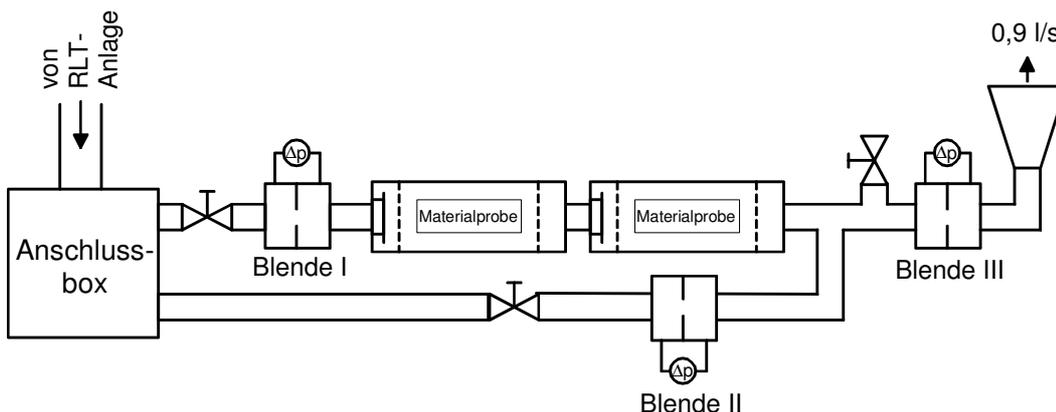


Abb. 40: Experimenteller Aufbau zur Überprüfung der Additionsregeln für die empfundene Intensität von Geruchsstoffen

Anschließend konnte die belastete Luft aus den Kammern mit nicht belasteter Luft aus der RLT-Anlage des Luftqualitätslabors verdünnt werden. Der Volumenstrom durch die Emissionskammern und der Volumenstrom am Trichter zur

Darbietung der Proben können in diesem Versuchsaufbau konstant gehalten werden.

In Abb. 41 und Abb. 42 sind die Ergebnisse dieser Additionsversuche dargestellt. Zunächst wurde die Verdünnungskurve für jeden einzelnen Geruchsstoff bestimmt. Anschließend wurden in beide Emissionskammern Materialien eingebracht, so dass eine Addition der Geruchsstoffe erzielt werden konnte.

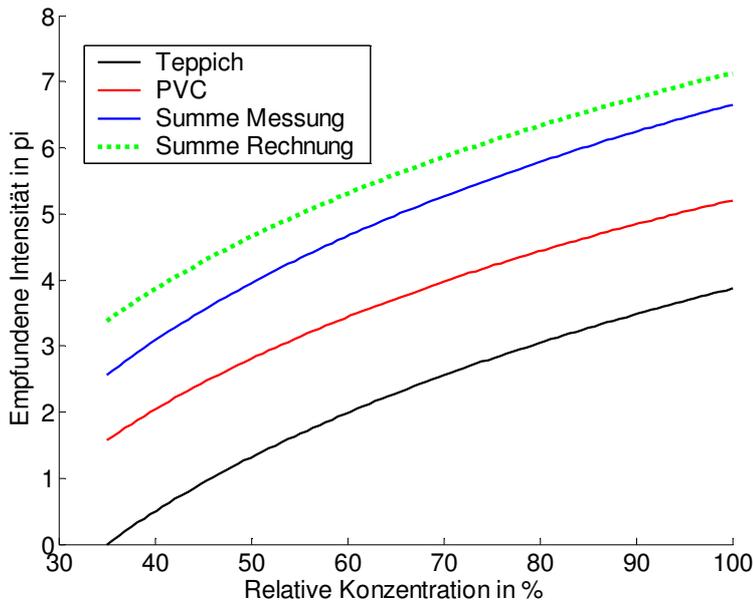


Abb. 41: Vergleich gemessener und mit der Pegeladdition berechneter empfundener Intensität von einem Teppich und einem PVC-Bodenbelag

Die Versuche mit einem Teppichmaterial und einem PVC-Bodenbelag zeigen eine befriedigende Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten Werten für die empfundene Intensität unter Verwendung der genannten Analogie zur technischen Akustik.

Die Addition von Azeton und einem PVC-Bodenbelag, siehe Abb. 42, ergibt eine deutlich bessere Übereinstimmung zwischen Experiment und Berechnung. Da in dem gezeigten Versuchsaufbau beide Emissionskammern nacheinander durchströmt werden, kann eine Beeinflussung des Messergebnisses durch Adsorption eines Geruchsstoffes aus der ersten Materialprobe an der zweiten Materialprobe nicht ausgeschlossen werden. Eine Adsorption war messtechnisch mit einem Gaschromatographen und Massenspektrometer nicht nachweisbar, ein Einfluss auf die olfaktorischen Bewertungen ist jedoch sehr wahrscheinlich. Dadurch könnte die unterschiedliche Qualität der Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung in den beiden Untersuchungen erklärt werden. In zukünftigen Versuchen werden die Emissionskammern in einer Parallelschaltung angeordnet, so

dass Adsorptionseffekte an den untersuchten Materialoberflächen ausgeschlossen werden können.

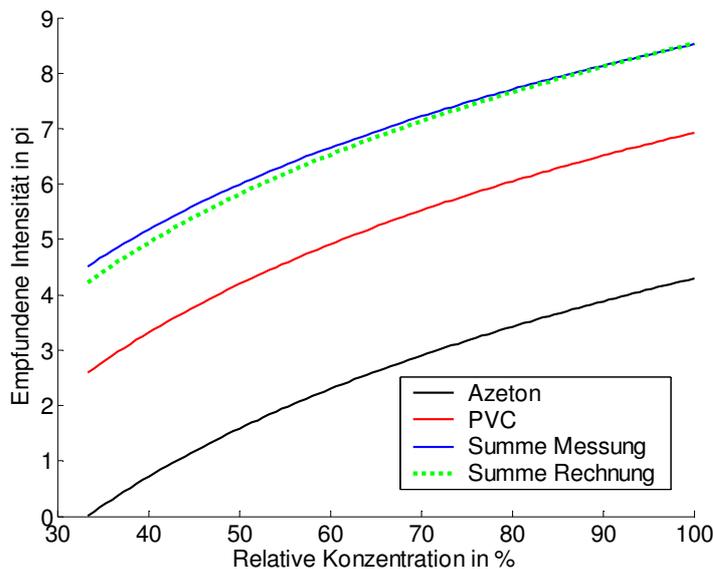


Abb. 42: Vergleich gemessener und mit der Pegeladdition berechneter empfundener Intensität von Azeton und einem PVC-Bodenbelag

5.4.5 Die zweite Stufe des Bewertungsverfahrens

Der fehlende Baustein in dem zweistufigen Bewertungssystem ist die Übertragungsfunktion zwischen der empfundenen Intensität und der empfundenen Luftqualität. Analog zum Licht, dessen Farben sich in einem Farbkreis einordnen lassen, bietet sich für das Geruchsempfinden ein analoges Verfahren unter Verwendung von Basisgerüchen, wie z.B. die von Amoore vorgeschlagenen Geruchsklassen an, siehe Tab. 8.

Duftklasse	Chemische Substanz
blumig	Phenylethyl-methyl-ethyl-carbinol
ätherisch	Ethylen-dichlorid
moschusartig	ω -Hydroxypentadecansäurelacton
kampferartig	Kampfer
schweißig	Buttersäure
faulig	Butylmercaptan
minzig	Menthon

Tab. 8: Kennzeichnung von Duftklassen nach Amoore et al. aus Schmidt³⁰

³⁰ R. F. Schmidt, H.-G. Schaible; „Neuro- und Sinnesphysiologie“; Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo; 2001; 379

Diesen Basisgerüchen können direkt chemische Substanzen zugeordnet werden, wodurch sich die experimentellen Untersuchungen mit diesen Geruchsstoffen vereinfacht. Falls alle Übertragungsfunktionen bekannt sind und diese überlagert werden können, ist eine Bestimmung der empfundenen Luftqualität auf Basis einer empfundenen Intensität und einer Zuordnung des Geruchsstoffes zu den Basisgerüchen möglich.

5.5 VDI-Verfahren

Seit Anfang der siebziger Jahre beschäftigten sich Wissenschaftler intensiv mit der Möglichkeit, Gerüche in der Außenluft messbar zu machen. Das Ergebnis waren die Richtlinien VDI 3881-3883 „Olfaktometrie – Geruchsschwellenbestimmung“ die mittlerweile in die europäische Norm DIN-EN 13725 eingearbeitet worden sind.

Bei dem VDI-Verfahren zur Bestimmung der Außenluftqualität dient die Geruchsschwelle einer Probe als Grundeinheit. Über ein Verdünnungssystem wird die Konzentration einer Probe so lange erhöht, bis die Geruchsschwelle erreicht wird. Die Geruchsschwelle definiert sich als die Konzentration von Geruchsträgern, bei der 50% der definierten Grundgesamtheit einen Geruchseindruck empfinden. Neben der Geruchsschwelle sind über das VDI-Verfahren noch zwei weitere Größen zu bestimmen. Mit dem Anstieg der Konzentration kann über den Anstieg der Geruchsempfindung von ‚nicht wahrnehmbar‘ bis ‚extrem stark‘ die Geruchsintensität erfasst werden (siehe Abb. 43), über die Änderung der Geruchsempfindung von ‚sehr angenehm‘ bis ‚sehr unangenehm‘ die hedonische Wirkung.

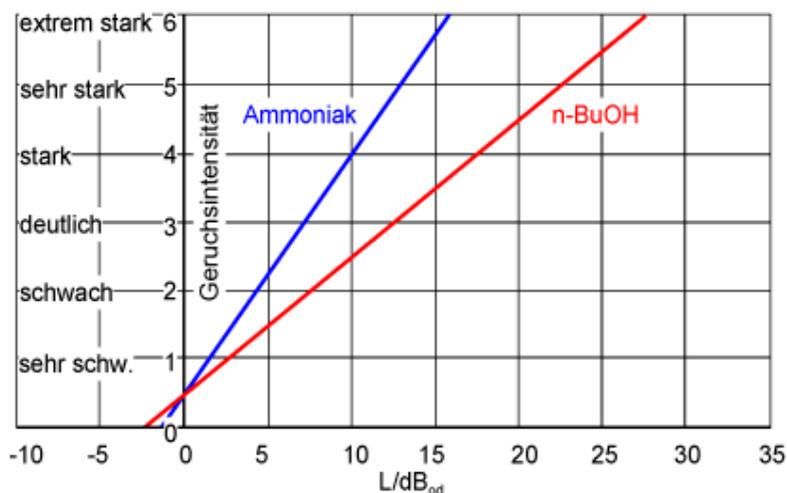


Abb. 43: Geruchspegel und Geruchsintensität

Wird der Geruch von Kaffee in niedrigen Konzentrationen noch als angenehm empfunden, so wird bei hohen Konzentrationen die Geruchswirkung unangenehm. Andere Stoffe wie beispielsweise Ammoniak oder Butanol weisen diese

Eigenschaft nicht auf und riechen schon bei niedrigen Konzentrationen unangenehm, siehe Abb. 44.

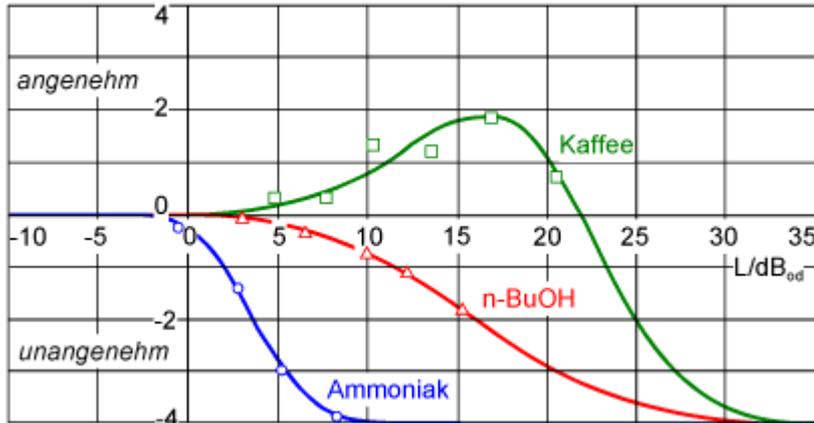


Abb. 44: Geruchspegel und Hedonik

Die in der VDI 3881-3883 beschriebenen Verfahren zur Bestimmung der Luftqualität gliedern sich in die Abschnitte Geruchsschwellenbestimmung, Bestimmung der Geruchsintensität, Bestimmung der hedonischen Geruchswirkung und psychometrische Erfassung der Geruchsbelästigung.

Einige Anweisungen beziehen sich auf Problemstellungen, die nur im freien Gelände auftreten, wie beispielsweise zeitliche Schwankungen der Geruchsbelästigung durch Windeinflüsse.

Von genereller Bedeutung sind die Vorschriften zur Probandenauswahl, Messgenauigkeit, Umgebungsbedingungen, Probennahme, Auswertungsverfahren und die Einführung der Grundbegriffe:

Geruchsschwelle

Die Konzentration von Geruchsträgern an der Geruchsschwelle führt bei 50% der definierten Grundgesamtheit zu einem Geruchseindruck

Geruchseinheit

[GE]

1 GE ist die Menge Geruchsträger, die in 1 m³ Neutralluft verteilt eine Geruchsempfindung auslöst

Geruchsstoffkonzentration

[C_{G,P}]

Durch Verdünnen einer Gasprobe wird die Geruchsschwelle bestimmt. Aus den Volumenströmen von Probe und Neutralluft ergibt sich der Zahlenwert der Geruchsstoffkonzentration der Gasprobe in [GE/m³]

Bestimmungsgrenze

[C_{G,84}]

Konzentrationen oberhalb liegen statistisch über der Geruchsschwelle

Für Untersuchungen nach dem VDI-Verfahren wird am Hermann-Rietschel-Institut das Olfaktometer TO7 der Firma Mannebeck eingesetzt, siehe Abb. 45. Es ermöglicht den zeitgleichen Einsatz von bis zu vier Probanden und benötigt einen Versuchsleiter.

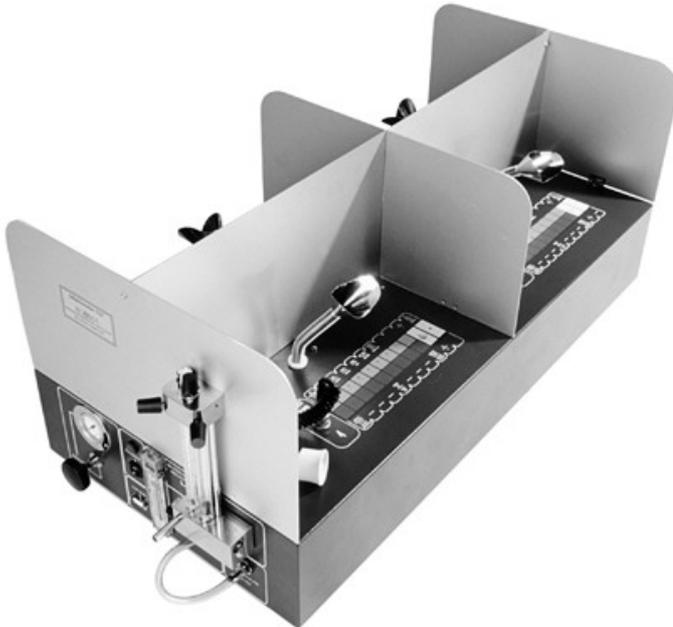


Abb. 45: Olfaktometer TO7

Betrieben wird das Gerät mit synthetischer Luft aus Stahlflaschen. Mit dieser Reinluft wird eine Gasstrahlpumpe betrieben, die Probenluft direkt aus dem Probenbeutel oder über das Vormischsystem ansaugt. Der Volumenstrom der Probenluft wird mittels Nadelventilen und Schwebekörperdurchflussmesser nach einer Vorgabe durch den Rechner eingestellt. Einstellbar sind Verdünnungsstufen von 1:2,5 bis 1:64.000. Mit Hilfe eines schrittmotorgesteuerten Drehschieberventils wird an den Riechmasken zwischen zwei Atemzügen der Probanden von Reinluft auf Mischluft und während der Ausatemphase auf einen sehr geringen Spülluftstrom umgeschaltet. Hierdurch arbeitet das System mit einem minimalen Probenluftbedarf von weniger als acht Liter pro Minute. Mit einer optischen Atemfrequenzvorgabe laufen diese Vorgänge für alle vier am Gerät arbeitenden Probanden synchronisiert ab. Das System wird von einem Notebook gesteuert, wobei nur die Einstellung der Verdünnung der Probenluft am Mischsystem nach Vorgabe durch das Steuerprogramm manuell durch den Versuchsleiter erfolgt. Die Messdaten mit der vollständigen statistischen Auswertung werden direkt nach der Messung über Bildschirmausgabe angezeigt.

Bauartbedingt eignen sich die Olfaktometer bei den oben genannten Verdünnungsstufen für die üblicherweise in Außenbereichen auftretenden hohen Geruchsstoffkonzentrationen.

Bei der Anwendung des VDI-Verfahrens hat sich das so genannte Limit-Verfahren durchgesetzt, bei dem den Probanden über ein Verdünnungssystem an Riechmasken abwechselnd Probenluft und Neutralluft zugeführt wird. Zunächst wird der Probenluft ein hoher Anteil synthetischer, geruchsfreier Neutralluft beige-mengt. In festgelegten Schritten wird die Konzentration der Probenluft durch Absenken des Neutralluftanteils soweit erhöht, bis alle Probanden eine Geruchswirkung empfinden, siehe Abb. 46.

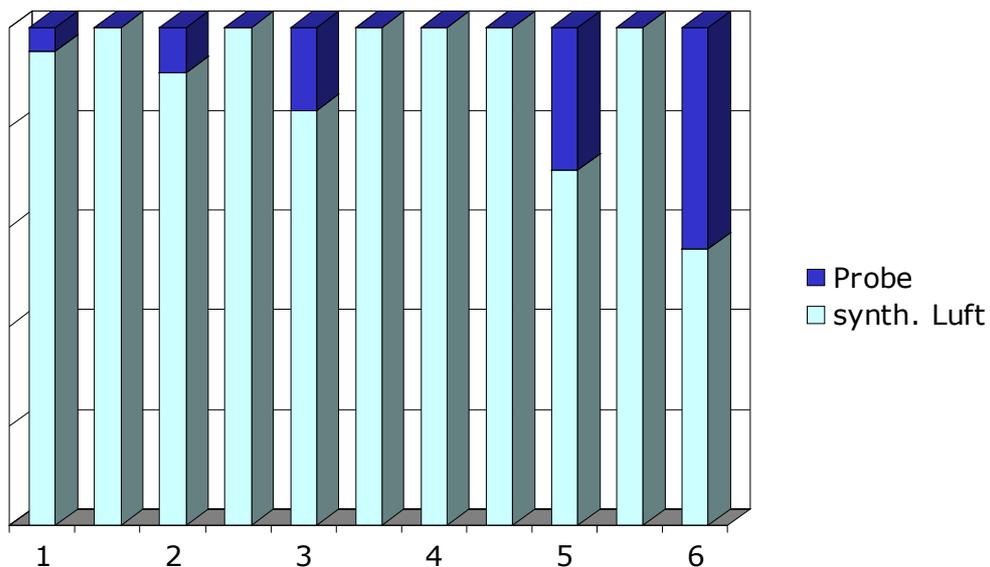


Abb. 46: Limitverfahren

Durch ein festgelegtes Auswertungsverfahren kann anschließend die Geruchsschwelle bestimmt werden. Um statistisch gesicherte Ergebnisse zu erhalten, muss mindestens zweimal in Folge die Probenluft zweifelsfrei erkannt werden. Daraus folgt, dass bei einer Verdünnung von 1:5 alle Probanden einen Geruchseindruck in der Probenluft erkannt haben müssen, um eine Messreihe werten zu können.

In Innenräumen treten Geruchsbelästigungen in niedrigen Konzentrationen, oft im Bereich der Geruchsschwelle, auf. Trotzdem können konstante Gerüche in diesem Bereich eine Belästigung darstellen, da sie immer noch von 50% der Bevölkerung wahrgenommen und möglicherweise als unangenehm empfunden werden (Oberthür, 1998)³¹.

Die Verdünnung einer so niedrigen Geruchsstoffkonzentration um das Verhältnis 1:5 kann zu einer deutlichen Unterschreitung der Geruchsschwelle in der Probe führen und ist somit in dem VDI-Verfahren nicht mehr auswertbar.

³¹ Oberthür, R.: Vergleich der olfaktorischen Geruchsmeßverfahren für Innenraum- und Außenluft, in: VDI Berichte 1373 Kommission Reinhaltung der Luft, Gerüche in der Umwelt, VDI-Verlag, 1998

Anwendungsbereiche erschließen sich für das Olfaktometer bei der direkten Bewertung von Geruchsstoffquellen. Wird unter Laborbedingungen beispielsweise das Emissionsverhalten von Baustoffen untersucht, können bei der Bewertung durch trainierte Probanden Werte von 30 dezibel um ein Vielfaches überschritten werden. Um so hohe Konzentrationen bewerten und vergleichen zu können, ist der Einsatz eines Olfaktometers sinnvoll wenn eine Geruchsstoffkonzentration von über 15 GE/m³ zu erwarten ist.

6 Technische Messverfahren

6.1 Chemische Analysen

Für chemische Analysen von Probenluft stehen zahlreiche Messverfahren zur Verfügung, wobei viele Messgeräte nur einen oder wenige Stoffe detektieren können. Eine umfassende Analyse der Zusammensetzung der Verunreinigungen in der Probenluft kann durch eine Gaschromatographie erreicht werden.

6.1.1 Beschreibung eines gaschromatographischen Systems

Die Gaschromatographie (GC) ist, wie alle anderen chromatographischen Verfahren, eine Trennmethode. Die wichtigsten Bestandteile gaschromatographischer Systeme sind, wie in Abb. 47 dargestellt, Injektor, Trennsäule und Detektor. Der Injektor dient zum Einbringen und Verdampfen der Probe. Wie die Probe in den Injektor eingebracht wird, hängt ganz von den zu untersuchenden Substanzen und Proben ab.

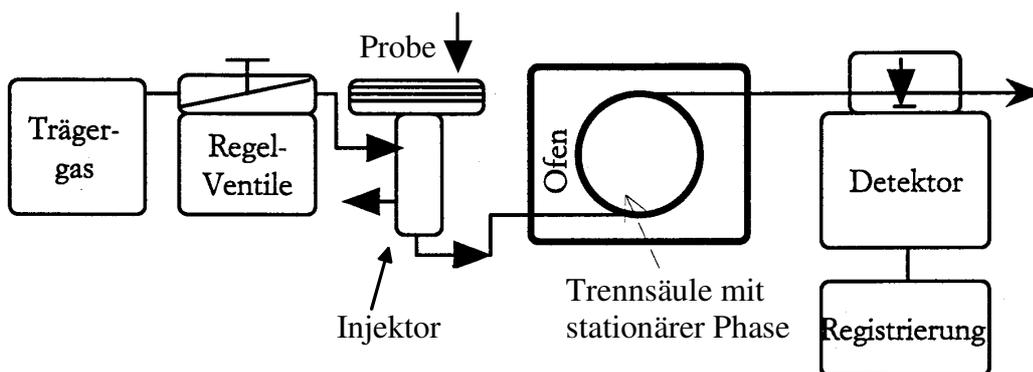


Abb. 47: Prinzipskizze eines Gaschromatographen nach Schram (Schram, 1995)³²

Die verdampfte Probe lagert sich an der stationären Phase der Trennsäule an. Die Trennsäule wird von der mobilen Phase, dem Trägergas, durchströmt. Dieses Gas übernimmt den Transport der Komponenten der zu trennenden Mischung. Die Trennsäule befindet sich in einem Ofenraum, wodurch die Auftrennung der Probe kontrolliert, isotherm oder (heutzutage üblicher) temperaturprogrammiert erfolgen kann, siehe Abb. 49. Der Detektor hat die Aufgabe, die aufgetrennten Stoffe zeitlich zu registrieren und eine elektrische Signalgröße zu liefern, um eine Quantifizierung und in Abhängigkeit vom Detektorsystem eine Identifizierung zu ermöglichen. Als Detektoren kommen verschiedenste Geräte zum Einsatz. Zunehmend ist eine Kopplung mit der nachweisstarken Massenspektroskopie Stan-

³² Schram, J.: Analytik luftgetragener Schadstoffe, Skript, Fachhochschule Niederrhein, Fachbereich Chemie, Krefeld, 1995

standard, die über die Quantifizierung hinaus wertvolle Informationen zur Substanz-Identifizierung liefert.

6.1.2 Auswertung von Gaschromatogrammen

Das Chromatogramm liefert wichtige Informationen über die Zusammensetzung einer Probe (Schomburg, 1987)³³. Es wird kontinuierlich über die Zeit (x-Achse) ein elektrisches Signal (y-Achse hier (englisch) Abundance) aufgezeichnet, das zu der Konzentration der getrennten Substanz proportional ist. Solange nur das Trägergas aus der Säule in den Detektor gelangt, wird die so genannte Basislinie registriert, siehe Abb. 48. Sobald eine der getrennten Komponenten mit dem Trägergas die Säule verlässt und in den Detektor gelangt, steigt das Signal entsprechend der Konzentration bis zu einem Maximum an und fällt danach wieder auf die Basislinie ab. So ergibt sich für jede getrennte Komponente ein „Peak“. Bei ähnlichen Retentionszeiten (die Zeit, bei der die Komponente getrennt wird und der Peak sein Maximum hat) verschiedener Komponenten kann es zu überlagerten Peaks kommen, wodurch eine Auswertung erschwert wird. Die Fläche unter dem Peak liefert Informationen über die Konzentration der getrennten Substanz. Arbeitet man mit einer oder mehreren Standardsubstanzen, so kann durch Vergleich der Flächen des unbekannten Peaks mit der Peakfläche des Standards eine Konzentration abgeschätzt werden. Die injizierte Menge (hier 1 µl) des Standards ist immer bekannt.

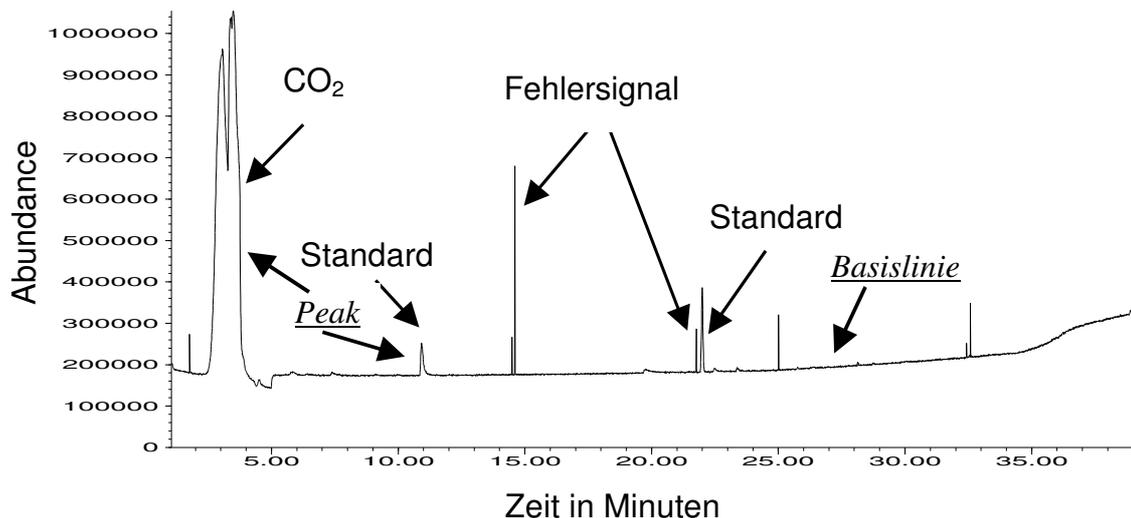


Abb. 48: Gaschromatogramm

³³ Schomburg, G.: Gaschromatographie Grundlagen, Praxis, Kapillartechnik, 2. Auflage, VCH Verlagsgesellschaft, 1987

Aufgrund von elektronischem Rauschen werden Fehlersignale ausgelöst. Unter einem Fehlersignal versteht man Striche in einem Chromatogramm, die keine Fläche ausbilden, siehe Abb. 48.

6.1.3 Thermodesorption und Kaltaufgabesystem

Flüchtige Bestandteile eines Materials oder flüchtige Bestandteile, die an einem Adsorbens gebunden sind, lösen ihre Bindung bei hohen Temperaturen. Dieses Prinzip macht sich die Thermodesorption zu Nutze.

Bei der Thermodesorption (TDS-System) werden in einem Ofen die mit einem Trägergas durchströmten Adsorptionsröhrchen bei hohen Temperaturen ausgeheizt. Die bei der Luftprobennahme adsorbierten Substanzen verlassen den Adsorber auf dem Weg, auf dem sie eingetreten sind. Das heißt, die Probenluft gelangt von einer definierten Seite auf den Adsorber und die in der Probenluft enthaltenen Substanzen verlassen ihn mit einem Trägergas auf dem gleichen Wege.

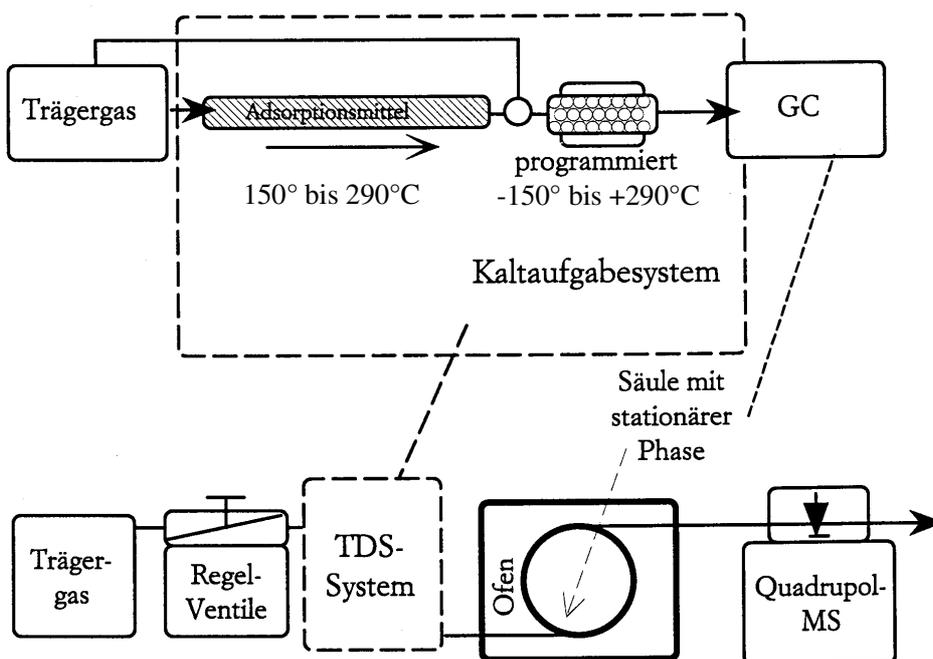


Abb. 49: Schematische Darstellung des verwendeten Systems mit Thermodesorption und Kaltaufgabesystem, sowie Massenspektrometer

Ist die Desorptionstemperatur für einen Stoff erreicht oder überschritten, wird er vom Adsorber desorbiert und vom Trägergas (Helium, Stickstoff) mitgerissen. Während der Aufheizphase werden die Stoffe je nach Desorptionstemperatur zu unterschiedlichen Zeitpunkten freigesetzt. Die Aufheizung des Desorptionsofens erfolgt mit einer konstanten Heizrate von 40 °K/min auf eine Temperatur von

290 °C. Diese Endtemperatur wird für 5 Minuten gehalten, um eine vollständige Desorption zu erreichen. Der gesamte Heizvorgang dauert 13 Minuten.

Die desorbierten Stoffe werden in einem Kaltaufgabesystem (Kühlfalle) kryofokussiert (gesammelt). Mit Hilfe von flüssigem Stickstoff wird das System auf -150 °C gekühlt, und damit die desorbierten Stoffe weit unterhalb ihres Siedepunktes gebracht und kondensiert. Durch schnelles Aufheizen des Kaltaufgabesystems von -150 °C auf 290 °C (Injektion), mit einer Heizrate von 10 °K/s, werden alle Substanzen verdampft und schlagen sich auf der Trennsäule nieder, wo sie in Wechselwirkung mit der stationären Phase der Säule treten. An der Trennsäule findet ein Ad- und Desorptionsprozess statt, der für jede Substanz unterschiedlich schnell abläuft. Am Ende der Kapillarsäule treten die Komponenten aufgetrennt, zu unterschiedlichen Zeiten in den Detektor ein.

Wird das zu testende Material direkt in das Glasröhrchen ohne Adsorbens (z.B. TENAX®) eingebracht, so spricht man von Direkt-Thermodesorption. Bei der Direkt-Thermodesorption wird je Material ein anderes Aufheizprogramm gefahren.

6.1.4 Massenspektrometer

Die in dem Gaschromatographen einzeln aufgetrennten Substanzen des Probenmischtes werden in die unter Vakuum stehende Ionisationskammer des Massenspektrometers eingeleitet und dort ionisiert. Anschließend werden die Ionen in einem Magnetfeld aufgrund der Lorenzkraft in Abhängigkeit von ihrem Gewicht unterschiedlich stark abgelenkt. Im eigentlichen Detektor, einem Sekundärelektronen-Vervielfacher, werden Signale erzeugt, welche im Gaschromatogramm sichtbar gemacht werden. Ein Massenspektrometer besteht also aus drei Teilen: einer Einrichtung zur Erzeugung von Ionen „Ionenquelle“, einer Trennvorrichtung „Analysator“ und dem Auffänger „Sekundär-Elektronen-Vervielfacher“ zur Registrierung der Ionen.

Der generelle Vorteil des Massenspektrometers gegenüber anderen Chromatographie-Detektoren ist, dass neben dem reinen Messsignal, das zum Peak im Chromatogramm führt, auch ein Massenspektrum ermittelt wird. Dieses Massenspektrum ist, wenn es unter definierten Randbedingungen (Standard Spectra Auto Tune) ermittelt wird, als ein Fingerprint („Fingerabdruck“) jeder Verbindung anzusehen. Durch Abgleich dieses definierten Massenspektrums mit einer Datenbank lassen sich wertvolle Hinweise zur Substanzidentifizierung gewinnen. Dem erfahrenen Analytiker liefert die Massenspektren-Interpretation auch Informationen, die weit über die Suchmöglichkeiten in Bibliotheken hinausgehen. Damit ist das Massenspektrometer den meisten anderen Chromatographiedetektoren deutlich überlegen.

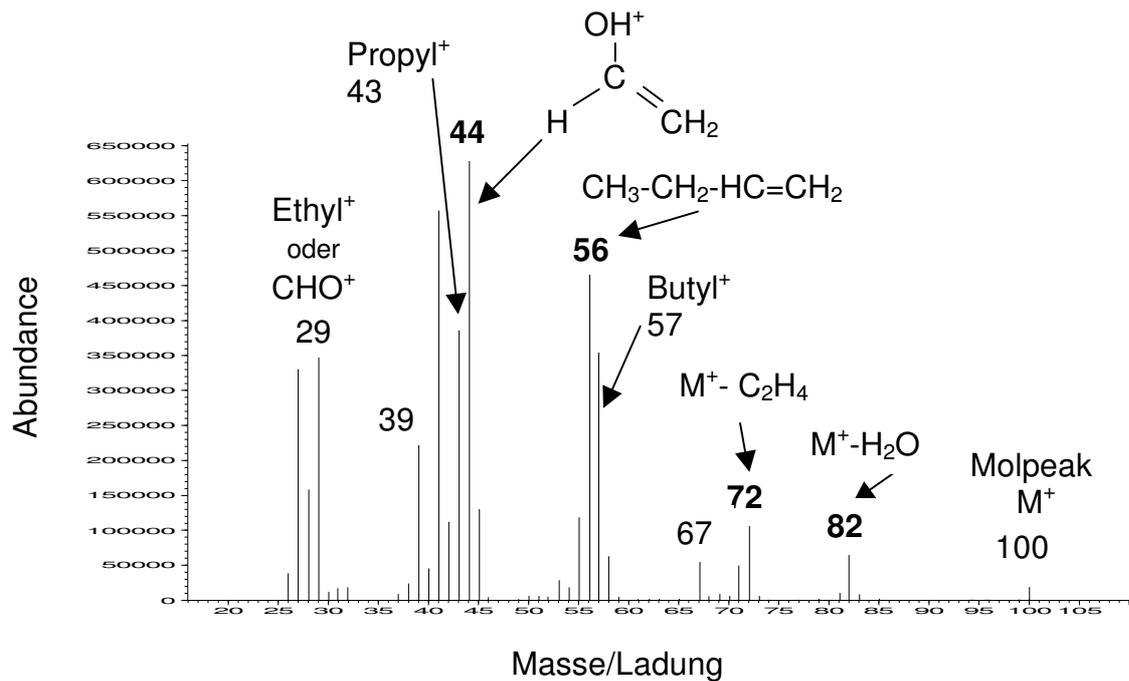


Abb. 50: Massenspektrum von Hexanal

In Abb. 50 ist das Massenspektrum für Hexanal abgebildet. Es ist die Signalgröße (Abundance) über dem Masse/Ladungs-Verhältnis aufgetragen. Das Molekül wird bei Eintritt in den Ionisator in Molekülfragmente geteilt. Es werden dabei positive Ionen verschiedener Massen erzeugt. Für den Stoff markante Masse-Ladungszahlen sind im Diagramm abgebildet. Die Target – Massen für Hexanal (56, 72 und 82) sind fett hervorgehoben. Unter Target – Massen versteht man die Massen, die den Stoff hauptsächlich charakterisieren. Die Massenspektren werden zur Analyse der Luftproben herangezogen.

6.2 Multigassensysteme

6.2.1 Funktionsprinzip eines Multigassensors

Multigassensysteme oder so genannte „Elektronische Nasen“ sind Kombinationen mehrerer Sensoren, zur Messung von flüchtigen organischen Komponenten in der Gasphase. Das Vorhandensein der Substanzen in der Raumluft, wird meistens durch das Messen von elektrischen Größen detektiert. Zu diesen Sensorsystemen gehört immer eine Weiterverarbeitung der Rohdaten. Erst durch die Kombination der Datenerfassung durch die Sensoren mit den jeweiligen Auswertalgorithmen, kann die elektronische Nase als Messgerät zur Bewertung der Verunreinigung oder der Geruchsbelastung der Probenluft herangezogen werden.

Die Sensoren besitzen keine hohe Selektivität und sprechen auf mehrere Substanzen an. Das Prinzip der elektronischen Nase beruht darauf, durch einen Satz Sensoren mit unterschiedlicher Sensitivität und Selektivität ein Signalmus-

ter zu erhalten, das einen Stoff oder ein Stoffgemisch charakterisiert. Die genaue Zusammensetzung des Gases kann nicht oder nur schwer ermittelt werden, da alle Sensoren auf mehrere Stoffe ansprechen. Die elektronische Nase ist ein Verfahren, bei dem charakteristische, summarische Parameter des Gasgemisches bestimmt werden.

Multigassensensorsysteme können mit verschiedenen Typen von Gassensoren realisiert werden, die sich in der Art der Detektion und der Messgröße unterscheiden. In den zurzeit kommerziell erwerbbaaren Systemen werden hauptsächlich Metalloxide, organische leitende Polymere, Schwingquarze und Oberflächenwellenleiter als Sensoren verwendet.

Metalloxidsensoren werden neben dem am häufigsten eingesetzten Zinnoxid (SnO_2) auch aus anderen Metalloxiden, wie ZnO , Fe_2O_3 und WO_3 , hergestellt. Bei diesen Sensoren wird der elektrische Widerstand des Sensors gemessen. Er dient als Maß für die an der Sensoroberfläche angelagerten Substanzen. Metalloxidsensoren arbeiten nur in einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre. Der Sauerstoff lagert sich an der Oberfläche der Sensoren an und nimmt Elektronen aus dem Leitungsband der Metalloxide auf. Dies führt zu einer Erhöhung des elektrischen Widerstands des Sensors. Zwischen den an der Oberfläche adsorbierten Sauerstoffspezies (O^- , O_2^- , O^{2-} , OH) stellt sich ein dynamisches Gleichgewicht ein. Strömt nun die Probenluft mit flüchtigen Substanzen über die Sensoroberfläche, so stellt sich ein anderes Gleichgewicht ein. Der Widerstand des Sensors verändert sich.

Für einen weiten Konzentrationsbereich besteht zwischen der Konzentration einer flüchtigen Substanz in der Probenluft und dem elektrischen Widerstand des Metalloxidsensors ein potentieller Zusammenhang ($R = A [c]^{-n}$).

Die unterschiedliche Sensitivität und Selektivität der Sensoren wird durch Zufügen von verschiedenen Katalysatormaterialien (Platin und Palladium) in unterschiedlichen Konzentrationen zu dem Metalloxid erreicht. Die Leitfähigkeit der Sensoren kann auch durch die Höhe der Temperatur beeinflusst werden, auf welche die Sensoren durch einen Heizdraht erhitzt werden. Je nach Metalloxid des Sensors liegen die optimalen Betriebstemperaturen bei 200 bis 500 °C. Die empfohlenen Temperaturen für SnO_2 -Sensoren liegen bei etwa 300 °C.

Es ist auch zu beachten, dass die Messwerte der Sensoren abhängig von der Luftfeuchte sind. Diese Abhängigkeit ist bei den Metalloxidsensoren aber im Vergleich zu anderen Sensortypen wie Schwingquarzsensoren und leitende Polymere, geringer.

Bei **Schwingquarzsensoren** (BAW – Bulk Acoustic Wave oder QMC – Quartz Micro Balance) sind massensensitive Sensoren. Bei ihnen dient die Schwingfre-

quenz als elektrische Messgröße. Piezoelektrische Materialien, die Quarze, besitzen die Eigenschaft, dass sie elektrische Energie in mechanische Energie transformieren und umgekehrt.

Die Sensoren bestehen aus einer dünnen Quarzscheibe, die auf Vorder- und Rückseite mit aufgedampften Goldelektroden versehen sind. Legt man an die Elektroden eine Wechselspannung an, so beginnen die Quarze aufgrund des piezoelektrischen Effekts auf ihrer Grundfrequenz zu schwingen.

Das sensitive Element des Sensors besteht aus einer Beschichtung des Quarzes mit verschiedenen Polymeren unterschiedlicher Sorptionseigenschaften. Durch Anlagern der Stoffe der Probenluft an der Polymerschicht ändert sich die Masse und dadurch auch die Schwingfrequenz des Quarzes. Die Frequenzänderungen aufgrund der Anlagerung sind verglichen mit der Grundschieffrequenz des Quarzes sehr gering (einige Hertz zu ca. 10 MHz) und so ist eine hohe Messgenauigkeit erforderlich.

Leitende Polymere: wie bei den Metalloxidsensoren dient auch bei diesen Sensoren die Leitfähigkeit (bzw. der elektrische Widerstand) als Messgröße. Sie zeigen reversible Veränderungen der Leitfähigkeit, wenn chemische Substanzen an der Oberfläche adsorbiert oder desorbiert werden. Die Polymere arbeiten bereits bei Raumtemperatur und niedrigeren Temperaturen im Bereich von 20-100 °C und benötigen somit kein aufwendiges Heizsystem und weniger Energie. Die Sensoren sind selektiver als Metalloxide und besitzen eine hohe Empfindlichkeit gegenüber organischen flüchtigen Substanzen. Die Signale der Sensoren sind aber im Gegensatz zu den Signalen der Metalloxidsensoren sehr viel stärker von der Luftfeuchte beeinflusst.

Oberflächenwellenleiter (SAW- Surface Acoustic Wave) sind wie Schwingquarzsensoren massensensitiv und es wird bei diesen Sensoren ebenfalls eine Frequenzänderung detektiert. Diese Sensortypen arbeiten mit akustischen Oberflächenwellen (SAW – surface acoustic wave).

6.2.2 Sensorsysteme am HRI

Am Hermann_Rietschel-Institut werden zur Zeit zwei Systeme eingesetzt: Moses II und Kamina.

Moses II ist eine elektronische Nase, die an der Universität Tübingen entwickelt wurde. Der Name MOSES steht für **Modulares Sensorsystem**. Sie besteht aus einem Computergehäuse (mit Netzteil und Messwertübertragung), in das unterschiedliche Sensormodule eingebaut und miteinander verschaltet werden können. Die Sensormodule bestehen aus einer Messkammer mit dem Sensor-Array

und einer Steuer- und Auswerteelektronik. Zusätzlich zu den Sensormodulen gibt es das Eingangsmodul, in dem sich die Flusssteuerung des Probenluftvolumenstroms mit drei umschaltbaren Probeneingängen und die Temperatur- und Feuchtemessung befinden.

Die Moses-Nase am Hermann-Rietschel-Institut, siehe Abb. 51, besteht aus dem Eingangsmodul, einem Quarzsensormodul und einem Metalloxidsensormodul. Das Quarzmodul besteht aus 8 massensensitiven und sehr feuchteempfindlichen Schwingquarzsensoren. Es hat sich bei den bisherigen Untersuchungen gezeigt, dass diese Sensoren zur Messung von Raumluftqualität wenig geeignet sind. Das zweite Modul besteht aus 8 Metalloxidsensoren. Diese werden durch eine elektrische Heizung auf einer Temperatur von ca. 300 °C gehalten.



Abb. 51: Sensorsystem MOSES II



Abb. 52: Sensorsystem Kamina

Das zweite System, Kamina, wurde vom Karlsruher Forschungszentrum entwickelt. Der Name Kamina steht für **K**arlsruher **M**ikronase. Sie ist eine elektronische Nase mit geringer Baugröße, die für den Betrieb allerdings noch eine externe Pumpe zur Probenluftförderung benötigt. Für Messungen der Umgebungsluft kann sie, wie in zu sehen, mit einem Messkopf mit Ventilator ausgestattet werden. Im Gegensatz zu MOSES hat Kamina auch keinen modularen Aufbau und kann nur als eine Einheit betrieben werden.

Die Nase besteht aus einem Steuer- und Auswerteteil und dem Messkopf mit dem Sensorchip. Über eine RS232 Schnittstelle können die Messdaten auf einen PC übertragen werden. Die Daten werden dort mit der zugehörigen Software MC

Shell ausgewertet. Über die Software ist auch die Einstellung der Betriebsparameter und die Steuerung der Messabläufe der Nase möglich.

Kamina besitzt 38 Metalloxidsensoren, die auf einen Chip aufgebracht sind. Zusätzlich zu den Gassensoren sind auf beiden Seiten des Chips (in Gasflussrichtung) Temperatursensoren angebracht. Durch vier verschiedene Heizelemente ist es möglich, ein Temperaturprofil über dem Chip einzustellen. zeigt das Sensorsystem Kamina .

6.2.3 Auswertung der Messsignale

Die Anwendung von Multigassensensorsystemen erfordert eine Weiterverarbeitung der Sensormessdaten. Je nach Aufgabe können qualitative, klassifizierende Verfahren oder quantitative Methoden herangezogen werden. Aufgrund des Haupteinsatzgebietes der Systeme zur Qualitätsüberwachung von Produkten werden die meisten Systeme bereits mit Software ausgeliefert, welche die gängigsten klassifizierenden und mustererkennenden Verfahren beinhaltet. Dies sind die Hauptkomponentenanalyse (PCA, engl. Principle Component Analysis) und die lineare Diskriminanz-Analyse (LDA, engl. Linear Discriminant Analysis).

Zur quantitativen Erfassung des Geruches oder der Verunreinigung ist eine Kalibrierung notwendig. Es werden hierfür Regressionsverfahren wie die Multiple Lineare Regression (MLR), die Hauptkomponentenregression (Kombination einer Hauptkomponentenanalyse mit einer MLR) und die Methode der partiellen kleinsten Fehlerquadrate eingesetzt. Eine weitere Möglichkeit liegt in der Anwendung biologisch inspirierter Verfahren wie künstliche Neuronale Netze (ANN, eng. Artificial Neural Networks). Im Folgenden sollen einige der Verfahren kurz erläutert werden.

Die **Hauptkomponentenanalyse** reduziert die hohe Anzahl an Sensordaten auf wenige Faktoren, den Hauptkomponenten, unter Ausnutzung der hohen Querempfindlichkeit der Sensoren. Das Verfahren beschreibt eine Koordinatentransformation der Eingangsdaten auf die Eigenvektoren der Sensordatenmatrix.

Die Daten der Sensoren werden hierfür in einer Matrix zusammengefasst. Diese können durch eine Linearkombination von Eigenvektoren ausgedrückt werden.

Durch diese Transformation gehen Informationen verloren, wenn man die Daten auf wenige Hauptkomponenten bezieht. Bei zwei bis drei Hauptkomponenten können 94 bis 99% der Information wiedergegeben werden. Dies resultiert aus der hohen Querempfindlichkeit der Sensoren.

Bei zwei Hauptkomponenten erhält man so eine Merkmalebene. Trägt man die Daten in einer Ebene auf, so liegen ähnliche Proben nahe beisammen. Proben die

sich stark unterscheiden liegen in anderen Bereichen der Ebene. Mit diesem Verfahren ist nur ein Vergleich zwischen Proben durchführbar. Aus den ermittelten Daten können keine direkten Schlüsse auf die Gaszusammensetzung gezogen werden.

Bei der **Hauptkomponentenregression** wird nun die durch eine PCA erfolgte Optimierung der Messdatenmatrix als Basis für eine multiple lineare Regression herangezogen. Die Regressionsfunktionen werden durch einen Satz an Trainingsdaten ermittelt, für welche die gewünschte Ausgangsgröße wie zum Beispiel die Geruchsintensität bekannt ist und zugeordnet werden kann.

Ein weiteres Verfahren stellt die **Lineare Diskriminanz-Analyse** dar. Diese Routine ist für die bisherigen Untersuchungen mit elektronischen Nasen am Hermann-Rietschel-Institut noch nicht eingesetzt worden. Ähnlich der PCA ist auch hier nur ein Vergleich der Daten zwischen verschiedenen Messungen möglich. Die Daten werden durch eine Transformation ebenfalls auf einen neuen Datenraum abgebildet. Anders als bei der PCA verwendet man nun nicht die Hauptkomponenten als Transformationsachsen und die Achsen müssen nicht mehr orthogonal zueinander sein. Für die Transformation werden Trainingsdaten benötigt. Die Daten werden anhand der gewünschten Ausgangsgröße in Klassen eingeteilt. Die Transformation des Datenraums wird nun durch geeignete Algorithmen so durchgeführt, dass folgende zwei Bedingungen optimiert werden: Die Klassen sollen möglichst kompakt (d.h. Messwerte innerhalb einer Klasse sollen enger zusammenrücken) und deutlich voneinander getrennt dargestellt werden.

Künstliche neuronale Netze sind informationsverarbeitende Prozesse, die durch das biologische Nervensystem inspiriert wurden. Sie bestehen aus einer hohen Anzahl untereinander verknüpfter Prozesseinheiten, den Neuronen, die in ihrer Gesamtheit ein spezifisches Problem lösen. Die Konfiguration des Netzes erfolgt wie in biologischen Systemen durch Lernen. Beim Lernprozess erfolgt eine Anpassung der Verknüpfungen der Neuronen.

Neuronale Netze besitzen den Vorteil, Prozesse abbilden zu können, deren Einzelschritte nicht bekannt sind. Sinnvolle Ergebnisse können jedoch nur erzielt werden, wenn man eine geeignete Struktur auswählt und ausreichend Daten zur Verfügung stehen, um die Netz-Parameter einzustellen. Erst durch das Training kann das Netz zur Lösung bestimmter Aufgaben eingesetzt werden. Durch das Training kann den Messdaten ein eindeutiger Wert zugeordnet werden. Eine Messung kann auch ohne weitere Vergleichsmessungen ausgewertet werden.

6.2.4 Einsatz von Multigassensensorsystemen in der Raumluftechnik

In der Raumluftechnik werden Multigassensensorsysteme bisher noch nicht eingesetzt. Ziel der Forschungsarbeiten am Hermann-Rietschel-Institut ist der Einsatz elektronischer Nasen zur Überwachung, Messung und Regelung der Geruchintensität in Innenräumen.

Haupteinsatzgebiet von Multigassensensorsystemen ist die Qualitätssicherung von Produkten und die Überwachung von Herstellungsprozessen in der Lebensmittel- und Parfümindustrie. Die Sensormesswerte der Probenluft werden mit Messwerten aus Messungen von Produkten in gewünschter Qualität verglichen. Liegen die Messwerte innerhalb des zulässigen Toleranzbereiches ist die Qualität eingehalten. In der Forschung werden die Systeme für viele denkbare Einsatzmöglichkeiten erprobt und weiterentwickelt, wie beispielsweise zur Diagnose von Krankheiten in der Medizintechnik, zur Gefahrenstoffanalyse und Detektion von Leckagen (Gasleitungen), zum Einsatz als Warnsensoren und in den Automobilen zur Steuerung der Lüftungsklappen.

.

6.3 Kombinierte Messverfahren

Für die Entwicklung von neuen Baustoffen ist eine kombinierte Analyse von chemischer Zusammensetzung und olfaktorischer Bewertung von Emissionen notwendig, da mit dieser Methodik geruchsrelevante Bestandteile eines Materials erkannt und substituiert werden können.

6.3.1 Sniffer/ Olfactory Detector Port (ODP)

Über den ODP (Olfactory Detector Port) wird die chemische Analyse durch einen Gaschromatographen mit der Geruchsbewertung der Menschen gekoppelt. Mit Hilfe des ODP (Olfactory Detector Port) lassen sich unter anderem olfaktorisch interessante Komponenten in einem Chromatogramm identifizieren, falls der Geruchsstoff mit dieser Analysetechnik eindeutig bestimmt werden konnte.

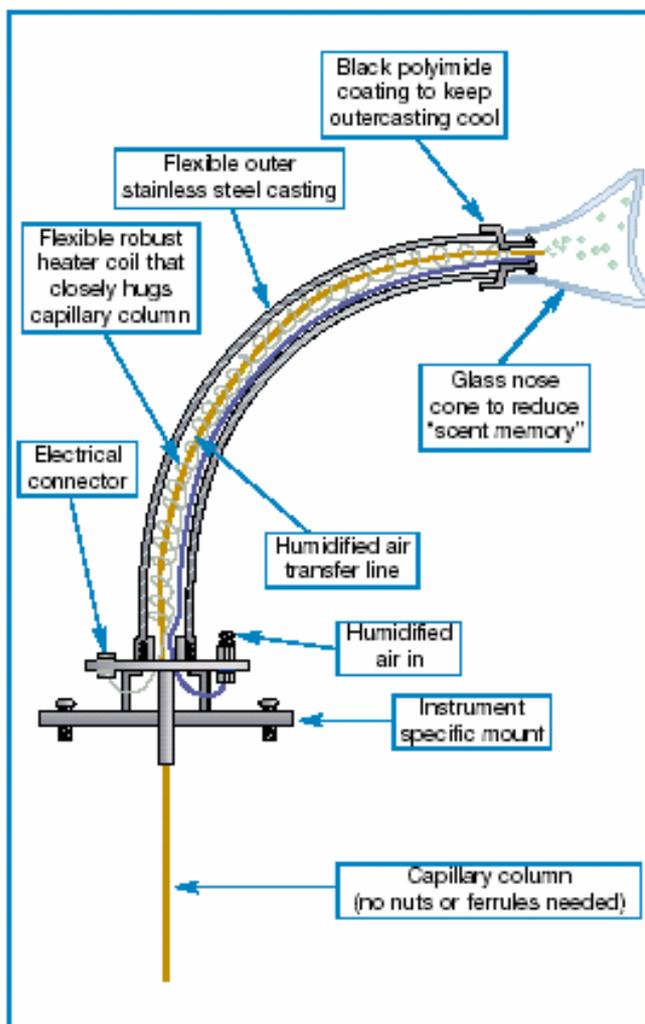


Abb. 53: Beispiel eines Sniffer-Ports (ODO II-Olfactory Detection Outlet der Firma SGE)

Ein Teil des vom Gaschromatographen kommenden Gasstroms (Eluat) wird zum sogenannten Olfactory Detector Port oder Sniffer umgeleitet, der andere Teil wird über einen analytischen Detektor (Massenspektrometer, Flammenionisationsdetektor) geleitet. Über diesen ODP können Personen direkt den aus dem Gaschromatographen kommenden Gasstrom olfaktorisch bewerten. Die Testperson steht am Auslass des Sniffer-Ports und hat einen Signalgeber in der Hand, mit dem sie signalisieren kann wann sie etwas geruchlich wahrnimmt. Der Zeitpunkt wird elektronisch registriert und kann dann mit dem Gaschromatogramm verglichen werden. Es können so die einzelnen Substanzen eines Gasgemisches herausgefunden werden, die für Personen geruchlich wahrnehmbar sind.

7 Normen und Richtlinien

7.1 DIN 1949 Teil 2

Raumluftechnik – Gesundheitstechnische Anforderungen

Die Luftqualitätsbewertung nach Fanger hat sich bereits in der deutschen Normung niedergeschlagen. In der DIN 1946-2 „Raumluftechnik- Gesundheitstechnische Anforderungen“ vom Januar 1994 sind drei Luftqualitätsklassen von hoch bis niedrig definiert.

Luftqualitäts- klasse	Prozentsatz Unzufriedener [%]	Empfundene Luftqualität [dezipol]
Hoch	≤ 10	0,7
Mittel	≤ 20	1,4
Niedrig	≤ 30	2,5

Tab. 9: DIN 1946-2 „Raumluftechnik- Gesundheitstechnische Anforderungen“

Die Werte der empfundenen Luftqualität ergeben sich aus einer Umrechnung der Grenzwerte für die Anzahl Unzufriedener auf dezipol mit der von Fanger aufgestellten Gleichung.

7.2 VDI 3881 – VDI 3883

Olfaktometrie

Die Richtlinie VDI 3881 wurden im Juli 2003 durch die Norm DIN EN 13725 ersetzt. VDI 3882 beschreibt die Bestimmung der Geruchsintensität und der hedonischen Wirkung von Geruchsproben. In der VDI 3883 werden die Wirkung und die Bewertung von Gerüchen behandelt (Psychometrische Erfassung der Geruchsbelästigung, Fragebogentechnik und Ermittlung von Belästigungsparametern durch Befragung).

7.3 DIN EN 13725

Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration mit dynamischer Olfaktometrie

Die Norm wurde 07/2003 herausgebracht und ersetzte die bis dahin gültige VDI Richtlinie 3881. Sie legt ein Verfahren zur Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration einer gasförmigen Probe durch Anwendung der dynamischen Olfaktometrie mit Personen als Prüfern fest. Sie dient zur Bestimmung der Emissionsströme von Geruchsstoffen aus Punktquellen, Flächenquellen mit und ohne definierten Volumenstrom fest.

Als Messeinheit wird die Europäische Geruchseinheit pro Kubikmeter [GE_E/m^3] eingeführt und entspricht per Definition der Geruchsstoffkonzentration an der Wahrnehmungsschwelle. Die Ermittlung der Geruchsstoffkonzentration der Probe erfolgt durch Verdünnen bis zur Wahrnehmungsschwelle und wird durch ein Vielfaches dieser Schwelle ausgedrückt.

7.4 ASHRAE Standard 62-2001

Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality

Acceptable indoor air quality: air in which there are no known contaminants at harmful concentrations as determined by cognizant authorities and with which a substantial majority (80% or more) of the people exposed do not express dissatisfaction.

Die Richtlinie gibt ähnlich der DIN 1946 Teil 2 erforderliche Außenluftvolumenströme je nach Gebäudeart und Nutzung an.

7.5 CEN Bericht CR 1752

Deutsche Fassung: DIN-Fachbericht 79

Lüftung von Gebäuden – Auslegungskriterien für Innenräume

Der Bericht gibt Formeln, die nach Anforderungen an die Behaglichkeit und an die Gesundheit getrennt sind, zur Berechnung der erforderlichen Außenluftvolumenströme an.

Bei Anwesenheit von gesundheitsgefährdenden Stoffen muss der aus Gesundheitsgründen erforderliche Luftvolumenstrom aus der Verunreinigungslast des Stoffes in $\mu g/m^3$ ermittelt werden.

Der Bericht beinhaltet weiter Tabellenwerte mit erforderlichen Luftvolumenströmen für Räume in verschiedenen Gebäudetypen (Anforderungen an die Behaglichkeit). Für die Berechnung der zu erwartenden Verunreinigungslast werden in dem Bericht Angaben zu sensorischen Verunreinigungslasten, die durch Personen und Gebäude (einschließlich Möbel, Teppichen und raumluftechnischen Anlagen) verursacht werden, gemacht.

7.6 DIN EN 13419-1

Bestimmung der Emission von flüchtigen organischen Verbindungen (Teil 1: Emissionsprüfkammer-Verfahren)

Diese Norm beschreibt die Prüfung der Emissionen von Baumaterialien, von dem Prüfprinzip, Prüfeinrichtung, Prüfstück bis zum Prüfverfahren und dem Prüfbericht. Es wird nur die Prüfung der VOC-Emissionen aus dem Material ohne Bewertung der empfundenen Luftqualität durchgeführt.

7.7 M1 Emission Classification of Building Materials

Protocol for Chemical and Sensory Testing of Building Materials

The Building Information Foundation RTS, Finland

Diese finnische Richtlinie beschreibt die Prüfung der Emissionen von Baumaterialien von der Probenahme, Probelagerung bis zum eigentlichen Prüfen. Prüfungen der VOC-Emissionen aus dem Material sowie die Prüfung der Geruchsabgabe über CLIMPAQs sind in dieser Richtlinie beschrieben. Die Richtlinie verweist bei dem Vorgehen der sensorischen Prüfungen mit CLIMPAQs auf die Nordtest-Methode NT BUILD 482.

7.8 Nordtest Methode NT BUILD 482

Nordtest, Espoo, Finland

Die Methode beschreibt sowohl die Durchführung von chemischen als auch sensorischen Messungen von Baumaterialien in den CLIMPAQ-Testkammern. Diese Methode wird auch in Dänemark verwendet.

7.9 Nordtest Methode NT BUILD 484

Nordtest, Espoo, Finland

Beschreibt die Messung mit der FLEC – Field and Laboratory Emission Cell.